

Testes sísmicos de três componentes para Resposta de Sítio: Caso de estudo Boavista – Foz

Ana Catarina Almeida

Mestrado em

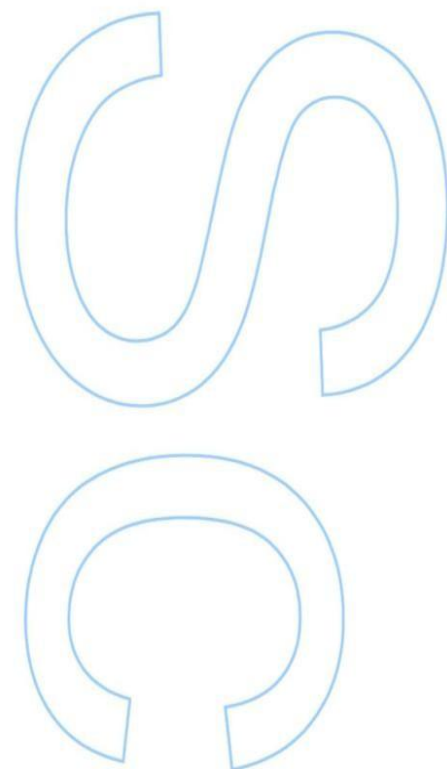
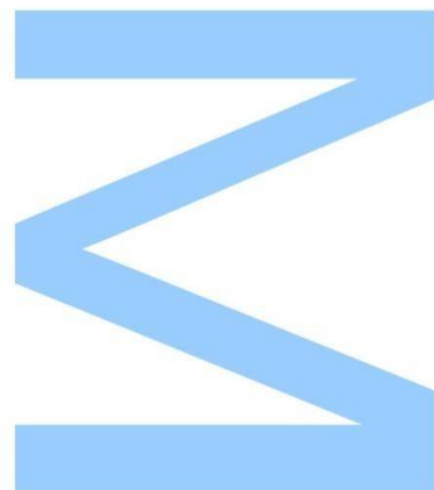
Geologia

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento de Território 2016

Orientador

Rui Moura, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências

Universidade do Porto

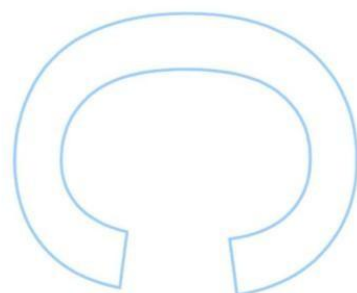
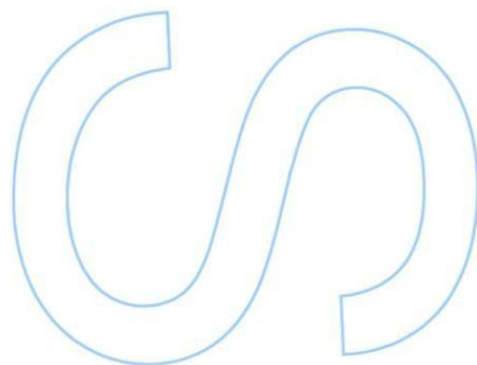
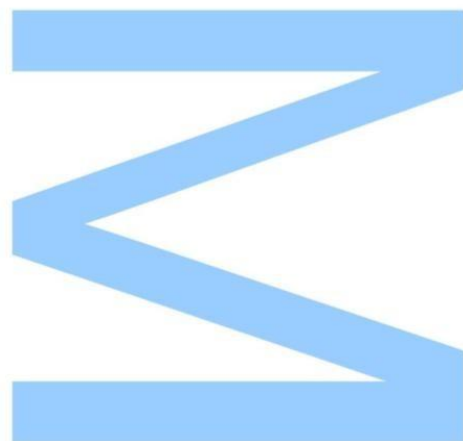


|

Todas as correções
determinadas pelo júri, e só
essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ___/___/___



Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles envolvidos na realização deste trabalho e, igualmente, a todos os que me acompanharam ao longo de todo o percurso académico que, com este trabalho se conclui.

Ao Professor Rui Moura gostaria de agradecer pela orientação e disponibilidade que, por vezes, foram necessários.

Aos meus amigos, em especial à Ana Marta Gonçalves e à Joana Cardoso pela sua disponibilidade, paciência e apoio, para enfrentar qualquer desafio.

Por fim, e com um sentimento especial, agradeço à minha família por me proporcionar a realização desta etapa com todo o apoio e carinho e, que tanta importância tiveram e continuarão a ter na minha vida pessoal, académica e profissional.

Resumo

Portugal Continental, localizado numa região de sismicidade moderada, foi atingido ao longo dos tempos por vários sismos, que nalguns casos provocaram estragos significativos e vítimas.

As características geológicas e geotécnicas são dos fatores mais importantes para a avaliação da perigosidade face a uma eventualidade sísmica.

O diferente comportamento sísmico das várias formações geológicas que constituem o substrato da cidade do Porto e as diferenças na topografia, levaram à observação de diferentes intensidades sísmicas.

Neste trabalho, é estudada a região da Boavista - Foz marcada pela presença de deformações variscas quer nos metassedimentos quer nos ortognaisses. Estas anisotropias foram provocadas pelas deformações frágeis F_1 e F_3 da Orogenia Varisca.

Para avaliar as diferenças comportamentais sísmicas na zona estudada, procedeu-se à caracterização geológica, através da recolha, interpretação e tratamento de dados de ensaios e a caracterização geotécnica através de tratamento de dados *in situ*. Este tratamento permitiu definir em pormenor a estrutura geológica e, contribuir para caracterizar geotecnicamente as unidades litológicas presentes na área base de estudo

Como facto mais relevante, aponta-se as formações superficiais na zona Boavista - Foz e as suas frequências próprias, e cruzam-se os resultados com as características da litologia da zona para uma estimativa de potenciais danos sísmicos. Podendo-se considerar que no geral, a zona em questão obteve resultados de frequências baixas e altas e que, de acordo com esta informação, teria de haver um cruzamento de resultados com os edifícios construídos na zona para saber a sua frequência de vibração e assim se proceder de forma preventiva.

Palavras-Chave: Comportamento sísmico, intensidades sísmicas, cartografia geotécnica, resposta sísmica, horizontal to vertical spectral ratio, caracterização geotécnica, unidades geotécnicas, danos sísmicos.

Abstract

Continental Portugal, localized in a region of moderate seismicity, was hit through the years with several earthquakes that in some case caused a lot of damage and victims.

The Geological and Geotechnical characteristics are some of the most important factors in the evaluation of seismic hazard.

The different behavior of the several geological formations that form the bedrock of the city of Porto, and the topography differences lead to the observation of the different seismic intensities.

In this paper, the studied region was Boavista-Foz, marked by the presence of Varisc deformations whether in the metasediment, whether in the orthogneiss. This anisotropy was caused by the fragile F1 and F3 deformations on the Varisc Orogeny.

To evaluate the different seismic behavior in the studied area, we characterized geologically the area, through the harvesting, interpreting and data analyzing of the tests, and the geotechnical description through analysis *in situ*. This analysis allowed us to define in detail, the geological structure and to geotechnically determine the lithological units present in the area of study.

We also point the superficial formations in Boavista - Foz and its fundamental frequencies, and cross the results with the lithological characteristics of the area in order to estimate the potential damage in case of an earthquake. Considering that in general, the area in question obtained low frequency results as well as high frequencies, and according to this data, it would have to be made a crossing of the results with the constructed buildings in Boavista-Foz, and proceed in a cautious way.

Índice

Agradecimentos	4
Resumo	6
<i>Abstract</i>	8
Índice	10
Índice de Figuras	13
Índice de Tabelas	19
CAPÍTULO I	11
I.1. Introdução	12
I.1.1. Estado de Arte	12
I.2. Objetivos	14
CAPÍTULO II	16
II.1. Enquadramento Geográfico.....	17
II.2. Enquadramento Geomorfológico.....	17
II.3. Enquadramento Geológico	18
II.4. Enquadramento Geotéctónico	21
II.5. Enquadramento Geotécnico	22
CAPÍTULO III	24
III.1. Conceitos teóricos.....	25
III.1.1. Ondas sísmicas, pulso e raio.....	25
A. Ondas Sísmicas.....	25
B. Pulso.....	26
C. Raio (r)	26
III.1.2. Refração: Lei de <i>Snell</i>	26
A. Parâmetro do raio (p).....	27
III.1.3. Velocidade sísmica.....	29
III.1.4. Ondas sísmica.....	30
B. Ondas superficiais.....	32

III.1.5. Características sísmicas da Terra	33
A. Diferença Manto-Núcleo	33
B. Outras características sismológicas da Terra	33
C. Propagação das ondas.....	34
D. Recetores Sísmicos	34
III.2. Efeitos de sítio e microzonamento.....	35
III.2.2 sismicidade da região do Porto.....	36
III.2.1. Potencial para a rotura sísmica das falhas à superfície.....	36
CAPÍTULO IV	39
Metodologia e Resultados	39
IV.1. Método H/V – Conceitos teóricos.....	40
IV.1.1. Natureza do ruído sísmico	41
IV.1.2. Definição da resposta H/V	42
IV.2. Método H/V – Procedimento Experimental.....	43
IV.2.1. Processamento de dados	43
IV.2.2. Recolha de dados <i>in situ</i>.....	46
• <i>Itinerário das medições in situ</i>	48
IV.2.3. Unidades Geotécnicas	50
IV.2.4. Resultados obtidos no <i>Geopsy</i>	52
Ponto 1 - Rua de Agramonte 179-307, Porto	53
Ponto 2 - Rua de António Patrício, Porto.....	54
Ponto 4 - Avenida da Boavista 1563, Porto	56
Ponto 5 - Avenida da Boavista 1745, Porto	57
Ponto 6 - Avenida da Boavista 2112, Porto	58
Ponto 7 – Rua São João de Brito 9, Porto.	59
Ponto 8 – Avenida da Boavista 3302, Porto.	60
Ponto 9 - Rua de António Aroso 17, Porto	61
Ponto 10 - Avenida da Boavista 4599, Porto.	62
Ponto 11 - Avenida da Boavista 5036, Porto.	63

Ponto 12 - Praça Gonçalves Zarco 70, 4100 Porto.....	64
CAPÍTULO V	65
Interpretação dos resultados e Conclusões	65
VI.1. Resultados do método H/V	66
V.3. Conclusões	72
VII.1. Referências Bibliográficas.....	74

Índice de Figuras

Figura 1 - Localização do distrito do Porto.	17
Figura 2 - Mapa geológico simplificado da área em estudo (<i>Adapt.</i> Vieira da Silva & Flores, 2002).	19
Figura 3 - Mapa geológico do “Complexo Metamórfico da Foz do Douro” (extrato da Carta Geológica - Carta Geotécnica do Porto 1: 10 000; <i>adapt.</i> Noronha <i>et al.</i> , 2003).	20
Figura 4 - Zonas geotectónicas da Península Ibérica (Chaminé 2000). ZC – Zona Cantábrica; ZAOL- Zona Astúrica Ocidental Leonesa; ZGTM – Zona Galiza-Trás-os-Montes; ZCI – Zona Centro Ibérica; ZOM – Zona de Ossa Morena; ZSP – Zona Sul Portuguesa.	21
Figura 5 – Carta Geotécnica do Porto (extrato da Carta Geológica - Carta Geotécnica do Porto 1: 10 000; <i>adapt.</i> Noronha <i>et al.</i> , 2003).	23
Figura 6 - Lei de <i>Snell</i> (v_1 - velocidade sísmica inicial; i_1 - ângulo de incidência; v_2 - velocidade sísmica refratada; i_2 - ângulo de refração).	27
Figura 7 - Esquema representativo do cálculo dos ângulos i_1 e i_2 (Mussett A.E., & Khan M. A., 2000).	27
Figura 8 – Equação da lei de Snell	27
Figura 9 - Percorso do raio nas camadas da Terra.	28
Figura 10 – Equação da lei de Snell	28
Figura 11 - Perfil velocidade-profundidade e estrutura da Terra (Mussett & Khan, 2000).	29
Figura 12 - Propagação das ondas P (Mussett & Khan, 2000).	30
Figura 13 - Propagação das ondas S (Mussett & Khan, 2000).	31
Figura 14 - Relação da reflexão e refração entre as ondas p e s.	31
Figura 15 - Propagação das ondas <i>Rayleigh</i> (Mussett & Khan, 2000).	32
Figura 16 - Propagação das ondas <i>Love</i> (Mussett & Khan, 2000).	32

Figura 17 - Mapa de intensidade macrossísmica de Portugal.	38
Figura 18 - A: Componentes Vertical, Norte e Este; B: Estimação do espectro de cada componente (azul e verde – horizontal; vermelho – vertical); C: Relação entre o espectro horizontal e vertical (H/V), que revela a frequência fundamental da ressonância f_0' 10 Hz. (retirado de http://www.geopsy.org/wiki/index.php/H/V_spectral_ratio#cite_note-3).	40
Figura 19 - Exemplo de gráfico espectral H/V obtido através do <i>Geopsy</i>	45
Figura 20 - Janela de ruído representativo do gráfico apresentado na figura 19.	45
Figura 21 - Seleção das janelas de ruído para representação no espectro relativas ao gráfico representado na Figura 19.	45
Figura 22 - Representação da obtenção da frequência fundamental do espectro H/V (retirado de http://www.geopsy.org/wiki/index.php/H/V_spectral_ratio#cite_note-3).	46
Figura 23 - Direcção da recolha dos ensaios na carta geotécnica do Porto (extrato da Carta Geológica - Carta Geotécnica do Porto 1: 10 000; <i>adapt. Noronha et al., 2003</i>).	47
Figura 24 – Sismómetro SR04 Geobox.	47
Figura 25 - Disposição geográfica dos pontos onde foram efetuadas medições na carta geotécnica do Porto.	49
Figura 26 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 1.	53
Figura 27- Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 26). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.	53
Figura 28 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 2.	54

Figura 29 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 28). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 54

Figura 30 - Gráfico que relacionada três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 3. 55

Figura 31 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 30). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 55

Figura 32 - Gráfico que relacionada três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 4. 56

Figura 33 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 32). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 56

Figura 34 - Gráfico que relacionada três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 5. 57

Figura 35 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 34). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 57

Figura 36 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 6. 58

Figura 37 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 36). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 58

Figura 38 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 7. 59

Figura 39 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 38). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 59

Figura 40 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 40). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 60

Figura 41 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 8. 60

Figura 42 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 9. 61

Figura 43 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades

idênticas (gráfico apresentado na Figura 42). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 61

Figura 44 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 10. 62

Figura 45 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 44). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 62

Figura 46 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 11. 63

Figura 47 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 46). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 63

Figura 48 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 12. 64

Figura 49 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 48). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão..... 64

Figura 50 - Localização dos pontos 1,2 e 3 em relação à carta geotécnica. 69

Figura 51 - Posição dos pontos 4,5,6 e 7 em relação à carta geotécnica..... 69

Figura 52 - Posição do ponto 8 em relação à carta geotécnica.....	70
Figura 53 - Posição dos pontos 9 e 10 em relação à carta geotécnica.	70
Figura 54 - Posição do ponto 11 em relação à carta geotécnica.....	71
Figura 55 - Posição do ponto 12 em relação à carta geotécnica.	71

Índice de Tabelas

Tabela 1 Origem dos ruídos e a sua frequência.....	42
Tabela 2 Dados correspondentes aos locais de medição utilizando o método H/V.....	48
Tabela 3 Profundidade das unidades geotécnicas.....	50
Tabela 4 Unidades geotécnicas consideradas.....	51

CAPÍTULO I

Introdução e Objetivos

I.1. Introdução

O grau de danos provocado durante um sismo está relacionado não só com as características dinâmicas das construções, como também com a geometria das estruturas geológicas, as variações litológicas e as descontinuidades morfológicas. Estes fatores estão geralmente na base dos efeitos de agravamento (Ergin *et al.*, 2004; Psarropoulos *et al.*, 2007; Harbi *et al.*, 2007 *in* Victor (2006)). Duas das características de elevada importância no efeito amplificador são: a competência mecânica do substrato e a espessura das unidades geológicas (Mândrescu *et al.*, 2007).

Um dos métodos atualmente utilizados para caracterizar o comportamento sísmico do solo baseia-se na análise de registo de ruído sísmico ou vibrações ambientais. Estes estudos de ruído sísmico, permitem estimar frequências naturais das camadas do solo.

I.1.1. Estado de Arte

Desde o século XIX que se tem vindo a estudar o ruído sísmico. Em 1872, Bertelli instalou um pêndulo, que observou durante vários anos, notando algumas variações no seu comportamento e conseguindo obter uma correlação entre os microssistemas e a perturbação da pressão atmosférica.

Até metade do século XX, os estudos realizados eram mais qualitativos do que quantitativos, o progresso da tecnologia estava limitado pelas técnicas instrumentais. No entanto, alguns autores apontavam já importantes características do ruído. A relação entre microssismos, condições meteorológicas e a ondulação do mar foi apontada por Banerji (1924,1925) *in* Victor (2006).

Em 1958, Gutenberg serviu-se de referências bibliográficas que continham 600 referências de microssismos. Estas referências encontram-se em diferentes línguas e publicadas em revistas científicas, o que torna difícil obter informações de ruído até aos anos 50.

Entre os anos 50 e 70, o estudo da sismologia desenvolveu-se bastante quer ao nível de técnicas quer ao nível de equipamentos, gerando uma recolha positiva e interessante para uma melhor compreensão da origem do ruído. Muitos autores começaram a compreender as potencialidades do ruído (*i.e.* as suas aplicações) e

começaram a investigar a sua origem. Várias técnicas foram desenvolvidas usando o ruído, sendo as mais importantes baseadas na análise de registos obtidos num dispositivo de *array* (*i.e.* um conjunto de instrumentos que funcionam em simultâneo e que se encontram espacialmente dispostos de acordo com uma geometria).

Estes métodos estão relacionados com as propriedades da dispersão das ondas superficiais e levam à obtenção da velocidade das ondas de corte (ondas S) no solo.

Desde há algumas décadas, o número de publicações sobre o ruído sísmico (ou microssismos) tem aumentado todos os anos (European Commission – Research General Directorate, 2004). Algumas delas são dedicadas a perceber a origem do ruído mas a maioria, cerca de 95%, centra-se sobre a informação contida no ruído sísmico e/ou a sua aplicação direta em estudos específicos (Victor, 2006).

Atualmente, a aplicação mais importante do ruído sísmico é no estudo de microzonamento realizado em cidades ou em centros urbanos. Existem duas técnicas de maior relevo: razão espectral entre um registo efetuado no local e outro efetuado simultaneamente numa estação de referência, e a razão H/V. Sendo o método H/V o mais utilizado. No capítulo teórico serão descritos os aspetos do microzonamento (Victor, 2006).

I.2. Objetivos

Com base nos estudos de sismicidade utilizando o método H/V na zona compreendida entre a Boavista-Foz do Porto pretendemos compreender o comportamento das diferentes litologias da área em estudo. Assim, os principais objectivos a que nos propusemos encontram-se referidos seguidamente:

- Análise de dados relativos à propagação das ondas de superfície, em frequências.
- Relacionar litologias com as frequências obtidas.
- Definir dentro do possível, um efeito de sítio estimado para a área em questão.

CAPÍTULO II

Enquadramento Geográfico, Geomorfológico, Geológico e
Geotectónico e Geotécnico

II.1. Enquadramento Geográfico

O distrito do Porto é um distrito de Portugal limitado a norte pelo distrito de Braga, a leste pelo distrito de Vila Real, a sul pelo distrito de Viseu e pelo distrito de Aveiro e a oeste pelo Oceano Atlântico (Figura 1). Tem uma área de 2 395 km² e uma população residente de 2 027 191 habitantes (contagem de 2009).



Figura 1 - Localização do distrito do Porto.

II.2. Enquadramento Geomorfológico

“Orograficamente o Porto assenta numa série de colinas coroadas de planaltos, de maior altitude a nordeste baixando suavemente em direção ao oceano e à foz do Douro, e de modo abrupto para o lado do rio” (Carrington da Costa, 1938 *in* Noronha (2005)).

Com efeito a cidade do Porto está situada numa região onde a plataforma litoral, considerada como uma superfície de aplanamento de origem subaérea (Ferreira, 1983 *in* Noronha (2005)), corresponde a um conjunto de patamares escalonados, descendo para o mar a partir de uma linha de relevo “o relevo marginal”, o qual, na área da cidade se eleva a partir dos 80 metros (Araujo, 1991 *in* Noronha (2005)).

Segundo Noronha (2005) a geomorfologia da cidade não pode deixar de estar ligada aos sistemas de fracturação gerados aquando dos movimentos variscos e dos muitos rejogos que as fraturas então geradas sofreram até aos nossos dias. Isto é a morfologia da cidade tal como hoje a temos não é mais do que o resultado de uma muito longa modelagem que teve o seu início, logo a seguir ou já mesmo no fim da orogenia Varisca, já lá vão cerca 270 Ma.

Na cidade verifica-se que as orientações dos principais alinhamentos de fraturas são ENE-WSW a NW-SE, bem como as orientações mais tardias NNE-SSW a NS que são as mais marcadas. As direcções das diaclases medidas em locais distribuídos pelos afloramentos graníticos revelam como sistemas principais os de orientação NE-SW (N30° a N60°E), que é o mais marcado, e ENE-WSW a NW-SE (N100° a N140°E).

Foram estes os alinhamentos preferenciais para a referida modelagem da morfologia do Porto. Alinha de costa é subparalela ao grande acidente NNW-SSE que é a falha Porto-Tomar. O rio Douro é o responsável pelo vale estreito e profundo visível em toda a marginal e que se prolonga até à Foz, com vertentes íngremes e elevadas que apresentam em alguns pontos altitudes da ordem dos 80 metros, como na zona da ponte de D. Maria I, e de 70 metros nas proximidades da ponte da Arrábida, factos que não são normais para um rio já próximo da sua foz.

II.3. Enquadramento Geológico

O Complexo Metamórfico da Foz do Douro (CMFD) (Figura 2) situa-se na zona ocidental da cidade do Porto, estendendo-se ao longo de uma série de pequenas praias até 3,5 km para Norte da foz do rio Douro e tem sido, estudado por vários autores e dada a sua complexidade tem sido apresentadas diversas propostas, nomeadamente quanto às unidades litológicas presentes, sua idade e evolução geotectónica (Mendes 1967/1968; Noronha & Leterrier, 2000; Chaminé *et al.*, 2003, Ribeiro *et al.*, 2007, 2009 *in* Sousa *et al.*, 2014).

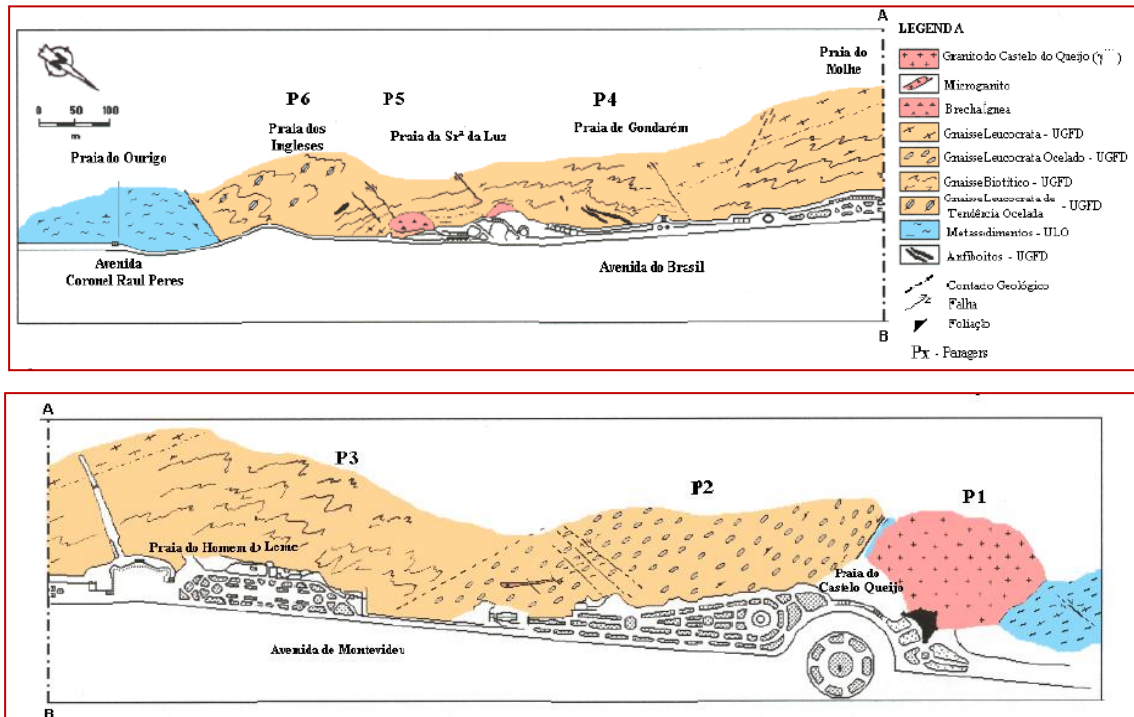


Figura 2 - Mapa geológico simplificado da área em estudo (Adapt. Vieira da Silva & Flores, 2002).

A geologia do CMFD é dominada pela presença de uma estreita faixa de rochas metamórficas intruídas por granitos variscos, muito bem representados no Castelo do Queijo. Estes granitos pertencem ao grupo dos granitos *tardi*-variscos (Mendes, 1967,1968; Silva, 1995; Martins *et al.*, 2001 *in* Sousa *et al.*, 2014), e definem, no seu conjunto, um alinhamento paralelo à zona de cisalhamento Porto-Tomar, que terá condicionado a sua instalação (Figura 3). Na faixa metamórfica estão representados magníficos afloramentos de rochas metassedimentares, especialmente associadas a ortognaisses de diferentes tipos e a anfibolitos (Borges *et al.*, 1985; Noronha & Leterrier, 2000; Ribeiro *et al.*, 2007 *in* Sousa *et al.*, 2014).

Segundo Sousa *et al.* (2014), estes afloramentos contrastam com os presentes na zona oriental da cidade, os quais não incluem ortognaisses e anfibolitos e onde micaxistos e metagrauvaques, numa sequência relativamente monótona e menos metamorfizada, são também recortados por granitos variscos.

O CMFD é constituído por duas unidades tectonoestratigráficas distintas: a “Unidade dos Gnaisses da Foz do Douro” (UGFD) e a “Unidade de Lordelo do Ouro” (ULO).

A UGFD é essencialmente constituída por anfibolitos e quatro tipos de ortognaisses: gnaisses biotíticos de composição tonalítica, gnaisses leucocratas de tendência ocelada, gnaisses leucocratas e gnaisses leucocratas ocelados, estes últimos nitidamente afetados por deformação cisalhante (Borges *et al.*, 1985 in Sousa *et al.*, 2014). Os três primeiros tipos constituem o essencial da faixa metamórfica a sul, enquanto que a norte a unidade tem um aspeto completamente distinto, sendo constituída, predominantemente, por gnaisses leucocratas ocelados (Sousa *et al.*, 2014).

A UGFD contacta a NE e SW com a ULO que é essencialmente constituída por micaxistos a que se associam, por vezes, rochas calcossilicatadas e anfibolitos. Os metassedimentos da ULO estão dobrados verificandose diferentes atitudes entre as foliações neles visíveis e as presentes nos gnaisses. Esta diferença de atitudes é ainda mais evidente nos pequenos retalhos de rochas metassedimentares dispersos no seio dos ortognaisses, o que atesta o carácter intrusivo dos protólitos destes últimos (Sousa *et al.*, 2014).

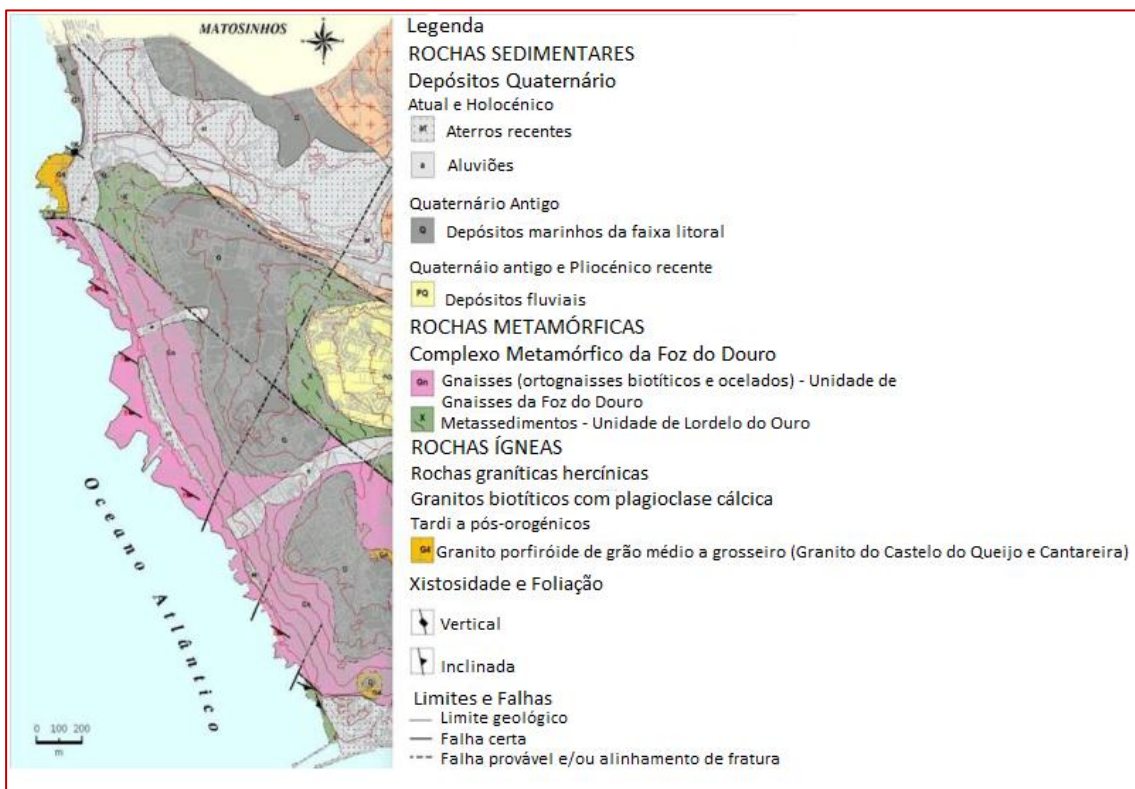


Figura 3 - Mapa geológico do "Complexo Metamórfico da Foz do Douro" (extrato da Carta Geológica - Carta Geotécnica do Porto 1: 10 000; adapt. Noronha *et al.*, 2003).

II.4. Enquadramento Geotectónico

A associação dos granitos à Cidade do Porto é inevitável, sendo que esta litologia toma proporções consideráveis na carta geológica deste local. Situa-se, sob o ponto de vista geológico, essencialmente na Zona Centro Ibérica (ZCI) (Figura 4).

Na área em estudo encontra-se o limite cartográfico entre a ZCI e a Zona de Ossa Morena (ZOM). Este contacto está marcado a ocidente pela zona de cisalhamento Porto - Tomar (ZCPT) que passa pela zona da Foz do Douro - Nevogilde, pelo que, mais precisamente se deve considerar que a cidade se situa no limite entre aquelas duas zonas geotectónicas.

A ZCI é caracterizada, nomeadamente, pela presença do “Complexo Xisto-Grauváquico” essencialmente constituído por micaxistos, bem representados na parte nascente de Vila Nova de Gaia e por variados tipos de rochas graníticas (como por exemplo o Granito do Porto).

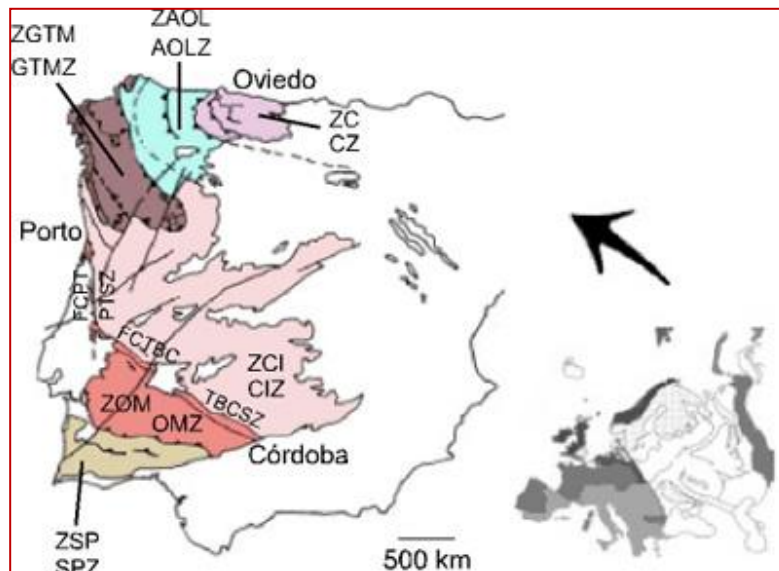


Figura 4 - Zonas geotectónicas da Península Ibérica (Chaminé 2000). ZC – Zona Cantábrica; ZAOL- Zona Astúrica Ocidental Leonesa; ZGTM – Zona Galiza-Trás-os-Montes; ZCI – Zona Centro Ibérica; ZOM – Zona de Ossa Morena; ZSP – Zona Sul Portuguesa.

A unidade hercínica da Península Ibérica é caracterizada pela existência de várias zonas geotectónicas, com características paleogeográficas, tectónicas, metamórficas e plutónicas distintas, que se dispõem paralelamente às linhas estruturais da cadeia hercínica (Julivert & col., 1974 *in* Noronha (2005)).

Na área da cidade, devido ao seu posicionamento geotectónico só são cartografáveis as estruturas relacionadas com as fases F_1 e F_3 hercínicas (Noronha (2005)).

Há a distinguir os terrenos pertencentes à ZCI e os da ZOM separados pela zona de cisalhamento Porto - Tomar (ZCPT), ativa desde F_1 e que durante F_3 deu lugar a um desligamento direito (Ribeiro & col., 1980 Noronha (2005)). Na área correspondente à cidade do Porto os metassedimentos da ULO registam as deformações de ZOM e os metassedimentos do CXG as da ZCI (Noronha (2005)).

De referir que, nos terrenos da ZOM, que são representados pelo que se designou por "Complexo Metamórfico da Foz do Douro" é possível reconhecer efeitos de deformações ante-hercínicas quer nos metassedimentos quer nos ortognaisses, além dos efeitos devidos às ações de F_1 e F_3 ; estas últimas são responsáveis, respetivamente, pela foliação $N120^\circ E$ subvertical que corresponde a uma clivagem de plano axial de dobras cujo eixo tem uma orientação WNW, com pendor variável, e por cisalhamentos $N120^\circ E$ a $N130^\circ E$, mais marcado nos gnaisses leucocratas ocelados (Noronha (2005)).

II.5. Enquadramento Geotécnico

Segundo a carta Geológica do Porto, distinguem-se 3 tipos de formações litológicas na cidade do Porto: as formações sedimentares de cobertura, as formações metamórficas e as formações de origem ígnea.

Na figura seguinte apresenta-se o mapa das diferentes unidades litológicas e a sua respectiva descrição.



UNIDADES GEOTÉCNICAS

	Aterros, lixeiras e/ou entulheiras (G1)
	Solos aluvionares e coluvionares (G2)
	Depósitos de praias e de terraços fluviais (G3)
	Solos residuais metamórficos medianamente compactos (G4-X)
	Solos residuais metamórficos compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade (G5)
	Solos residuais metamórficos medianamente compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade indiferenciados (G4-X e G5)
	Maciço metamórfico rochoso de fraca a excelente qualidade (G6)
	Solos residuais graníticos medianamente compactos intensamente caulinizados (G4-C)
	Solos residuais graníticos medianamente compactos (G4-G)
	Solos residuais graníticos compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade (G8)
	Solos residuais graníticos medianamente compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade indiferenciados (G4-G e G8)
	Maciço granítico rochoso de fraca a excelente qualidade (G9)

Profundidade das unidades geotécnicas

	I	< 5 metros
	II	5 - 10 metros
	III	10 - 15 metros
	IV	15 - 20 metros
	V	20 - 25 metros
	VI	25 - 30 metros

Limite entre unidades geotécnicas

	Limite geotécnico
	Limite geotécnico incerto
	Limite geotécnico em profundidade
	Limite geotécnico incerto em profundidade

Níveis geotécnicos em profundidade

	Nível 1 (superficial)
	Nível 2
	Nível 3

Figura 5 – Carta Geotécnica do Porto (extrato da Carta Geológica - Carta Geotécnica do Porto 1: 10 000; *adapt. Noronha et al., 2003*).

CAPÍTULO III

Sismologia

III.1. Conceitos teóricos

A sismologia é o ramo da Geofísica que estuda os sismos, as suas causas e os seus efeitos. É também utilizada para conhecer as características e a geometria da estrutura do subsolo usando para tal as ondas registadas resultantes de experiências controladas. Dessa forma o interior Terra pode ser caracterizado através do estudo da propagação das ondas dessa experiências bem como dos sismos que ocorrem permanentemente em todo o mundo (Mussett & Khan, 2000).

Esta temática da Ciência interpreta as ondas sísmicas libertadas devido à rutura de blocos rochosos depois de estarem sob efeito de fortes tensões; estas propagam-se no interior da Terra de forma irregular devido às refrações que sofrem ao intersetarem camadas com composições distintas. Estas ondas são registadas através de sensores altamente sensíveis designados de sismómetros (Mussett & Khan, 2000).

Seguidamente, apresentam-se alguns conceitos fundamentais relativos à sismologia.

III.1.1. Ondas sísmicas, pulso e raio

A. Ondas Sísmicas

As ondas sísmicas são movimentos vibratórios das partículas das rochas que se transmitem segundo superfícies concêntricas devido à libertação súbita de energia de energia no foco sísmico. São ondas que se propagam através da Terra geralmente como consequência de um sismo, ou devido a uma explosão.

Segundo Mussett & Khan (2000) as principais características das ondas sísmicas são:

- Comprimento de onda (λ): é o comprimento da onda medido entre as sucessivas cristas ou compressões das ondas. Este comprimento pode ser bastante mais longo quando comparado à espessura de um estrato ou camada;

- Amplitude (a): é o deslocamento máximo da crista da onda a partir da posição inicial estacionária;
- Frequência (f): número de picos de amplitude máxima de um sinal de oscilação periódica que passam num determinado ponto fixo em um determinado intervalo de tempo (medido em *Hz, ciclos por segundo*);
- Velocidade sísmica (v): velocidade á qual a onda se desloca (Km/seg).

B. Pulso

O pulso é o tempo em que uma onda sísmica percorre uma determinada distância no interior da Terra. Pode apresentar várias formas, no entanto, a mais simples é uma crista seguida de uma dilatação (Mussett & Khan, 2000).

C. Raio (r)

Na Terra, as ondas propagam-se a partir de uma fonte sísmica em todas as direções. O raio é apenas uma abstracção que representa o caminho de propagação de uma pequena porção da frente de onda ou pulso. É sempre perpendicular à frente de onda e vice-versa (Mussett & Khan, 2000).

III.1.2. Refracção: Lei de *Snell*

A refração acontece quando as frentes de onda atravessam obliquamente num corpo rochoso com uma velocidade sísmica mais elevada, o que provoca a agregação e mudança de direcção (Mussett & Khan, 2000).

$$\frac{\sin i_1}{v_1} = \frac{\sin i_2}{v_2} \quad \text{Snell's Law}$$

Figura 6 - Lei de *Snell* (v_1 - velocidade sísmica inicial; i_1 - ângulo de incidência; v_2 - velocidade sísmica refratada; i_2 - ângulo de refração).

As incógnitas i_1 e i_2 representam ângulos entre os raios e a normal de interface entre os dois tipos de rochas. Também se pode medir estes mesmos ângulos entre a frente da onda e a interface, como se pode ver na figura abaixo.

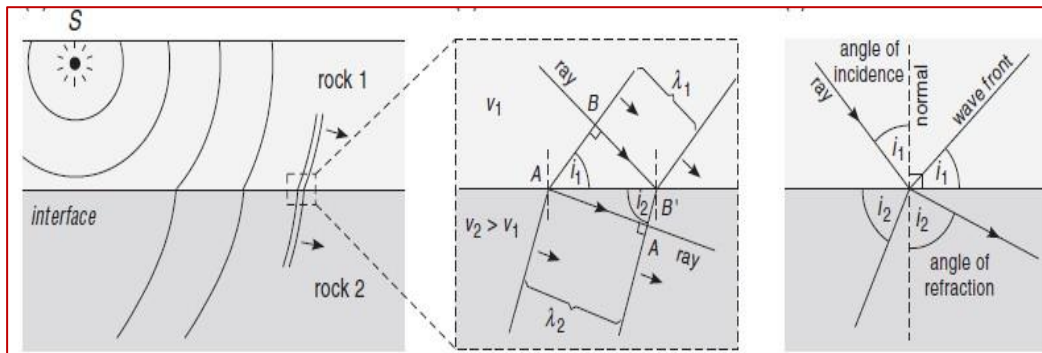


Figura 7 - Esquema representativo do cálculo dos ângulos i_1 e i_2 (Mussett A.E., & Khan M. A., 2000).

A. Parâmetro do raio (p)

Se existirem várias camadas paralelas e uniformes, $i_2 = i_1'$, o raio intersesta a próxima interface com o mesmo ângulo com que saiu do último. Logo, aplicando a lei de Snell temos que:

$$\frac{\sin i_1'}{v_1} = \frac{\sin i_2}{v_2} \quad \frac{\sin i_2'}{v_2} = \frac{\sin i_3}{v_3} \quad \dots$$

Figura 8 – Equação da lei de Snell
Sendo que $i_1' = i_1$, $i_2' = i_2 \dots$

A relação $(\sin i/v)$ é constante ao longo do percurso do raio. Visto que, as camadas no interior da Terra são curvilíneas (Figura 9), a diferença entre estes ângulos não depende da velocidade das camadas mas sim da geometria do triângulo ABO (Mussett & Khan, 2000).

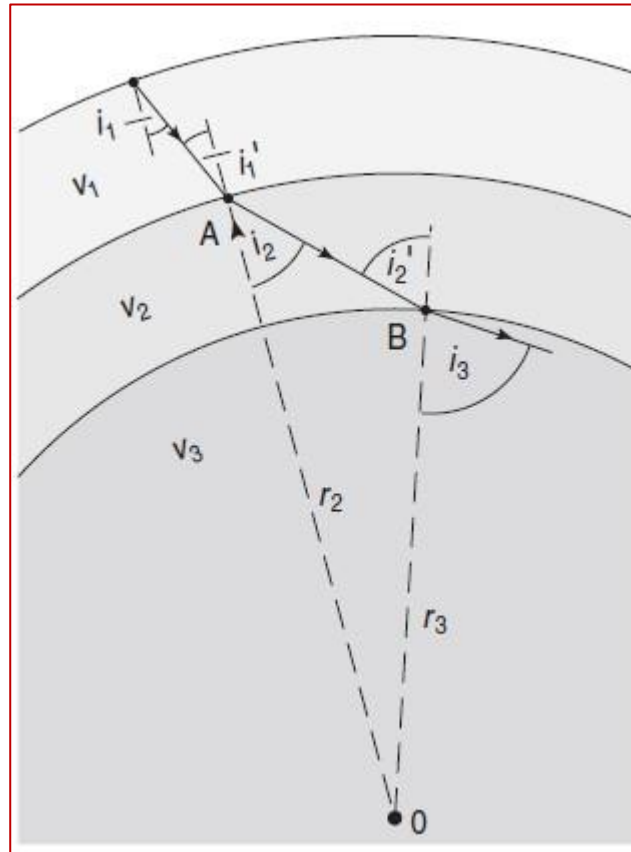


Figura 9 - Percurso do raio nas camadas da Terra.

Como a lei de *Snell* determina como o ângulo do raio varia aquando da passagem de diferentes camadas na Terra, esta geometria determina a alteração do ângulo entre as interfaces, sendo que, estas podem ser agrupadas numa só equação:

$$\frac{r_1 \sin i_1}{v_1} = \frac{r_2 \sin i_2}{v_2} = \dots = \text{constant} = p$$

Figura 10 – Equação da lei de Snell

O parâmetro do raio (p) é uma constante como é possível compreender através da equação apresentada anteriormente, tendo por isso, o mesmo valor ao longo da passagem de qualquer raio medido no mesmo local, providenciado pelas três entidades: v , i e r .

Na refração em qualquer interface o valor de r é igual em ambos os lados e o parâmetro p inclui a lei de *Snell* (Mussett & Khan, 2000).

III.1.3. Velocidade sísmica

Se a distância de r (raio) ao centro da Terra ou a variação de velocidade sísmica com a profundidade for conhecida, é possível deduzir o percurso dos raios usando o parâmetro do raio (Mussett & Khan, 2000).

Com a estimativa de um determinado modelo de velocidade, como por exemplo a figura 11, é possível calcular o tempo de trajecto entre a distância até aos recetores sísmicos, e assim comparar os resultados com os tempos observados. No caso de aparecer alguma discrepância, a curva ou modelo de velocidade em profundidade é ajustada de modo a minimizar as diferenças teóricas de tempos teóricos em relação aos valores registados (Mussett & Khan, 2000).

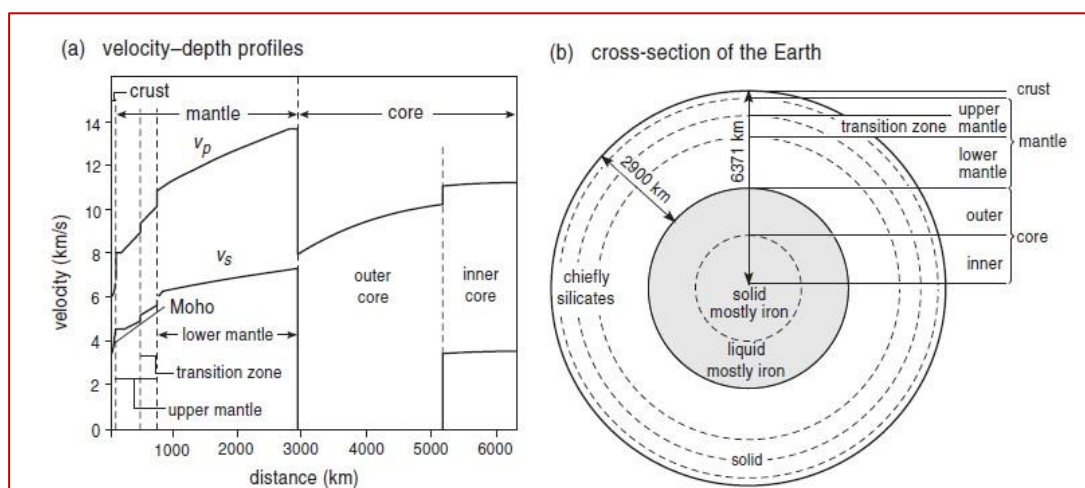


Figura 11 - Perfil velocidade-profundidade e estrutura da Terra (Mussett & Khan, 2000).

III.1.4. Ondas sísmica

As ondas de corpo segundo Mussett & Khan (2000) são subdivididas em transversais e longitudinais (Ondas S e P). Consideram-se longitudinais aquelas ondas cujo efeito é de provocarem o movimento de partículas de um sólido no mesmo sentido da propagação causando assim compressão e dilatação dos corpos na passagem da onda sísmica e alterando tanto a forma com o tamanho dos corpos.

Uma onda transversal, por seu turno, movimentam partículas de um sólido no sentido perpendicular à direcção da propagação alterando assim só a sua forma. As ondas transversais são chamadas de ondas S e as ondas longitudinais são chamadas de ondas P (figura 12). Estas ondas comportam-se, essencialmente, como as ondas sonoras, excetuando as suas frequências que no caso das ondas sísmicas são muito baixas para serem perceptíveis ao ouvido humano.

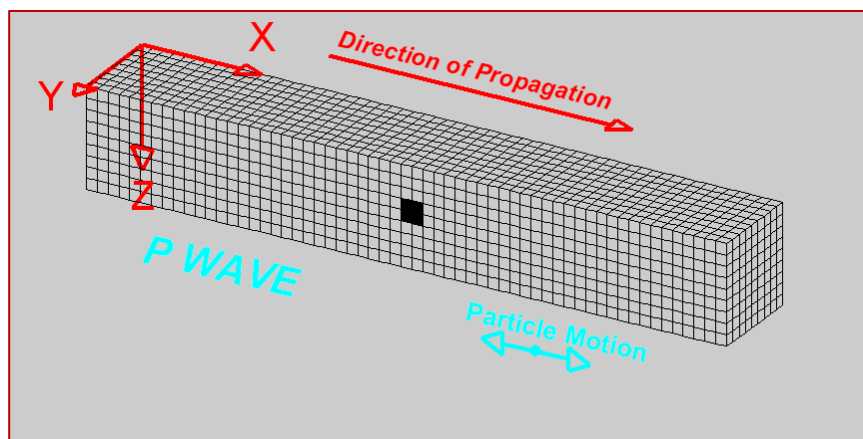


Figura 12 - Propagação das ondas P (Mussett & Khan, 2000).

Como as ondas S e P têm diferentes forças de restauração elástica, e efetivamente deformam as rochas de forma diferente, a propagação das mesmas também será a velocidades diferentes. As ondas P têm uma maior velocidade de propagação, o que faz com que estas sejam as primeiras ondas a serem detetadas pelos sismómetros.

As ondas S (Figura 13) não conseguem atravessar líquidos pois estes podem tomar qualquer forma e por isso não têm tendência a retomar a posição inicial. No entanto, as ondas P conseguem atravessar os líquidos uma vez que os líquidos resistem à compressão.

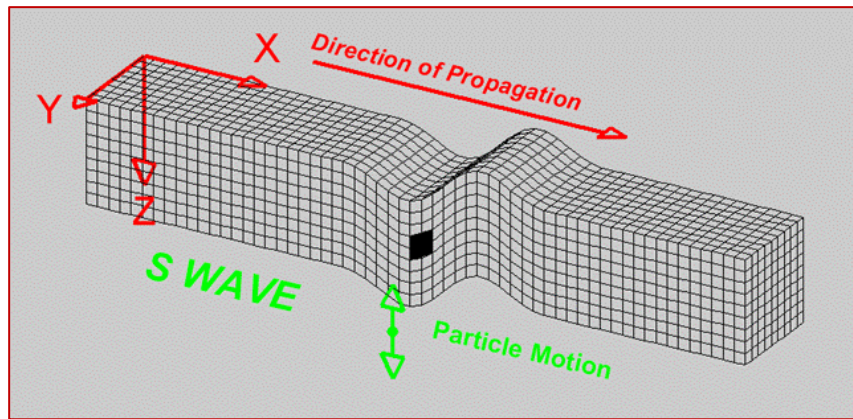


Figura 13 - Propagação das ondas S (Mussett & Khan, 2000).

Ambas podem também ser produzidas por conversão da onda, ou seja, por exemplo, quando um raio P é refratado e refletido por uma interface, raios S são também produzidos. Para determinar as direções dos diferentes raios aplica-se a lei de *Snell*, mas neste caso também para a reflexão, usando as velocidades dos raios P e S; exemplo para um raio S:

$$\begin{array}{l} \text{reflection: } \frac{\sin i_{1P}}{v_{1P}} = \frac{\sin i_{1S}}{v_{1S}} \\ \text{refraction: } \frac{\sin i_{1P}}{v_{1P}} = \frac{\sin r_{2S}}{v_{2S}} \end{array}$$

Figura 14 - Relação da reflexão e refração entre as ondas p e s.

Como a velocidade das ondas S é sempre menor que as ondas P, os ângulos dos raios S vão também ser menores. As amplitudes dos raios convertidos diminuem à medida que o ângulo de incidência, i_{1P} , diminui.

B. Ondas superficiais

As ondas superficiais são caracterizadas pela rápida diminuição da sua amplitude com a profundidade. Os dois tipos de ondas superficiais geralmente registadas em sismologia são as ondas *Rayleigh* e as ondas *Love*, representadas nas figuras 15 e 16.

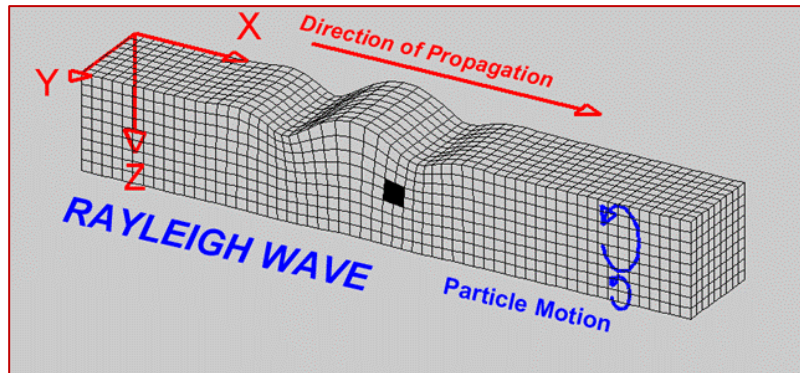


Figura 15 - Propagação das ondas *Rayleigh* (Mussett & Khan, 2000).

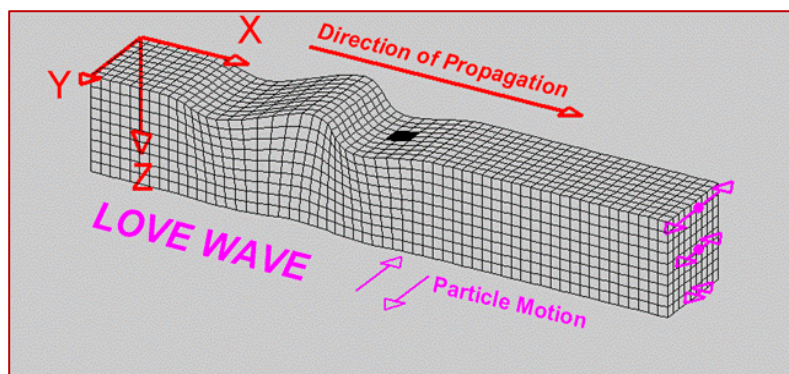


Figura 16 - Propagação das ondas *Love* (Mussett & Khan, 2000).

A principal diferença entre elas é que as ondas *Rayleigh* provocam a oscilação das partículas em movimentos elípticos vertical, retrógrados e em contrapartida, as ondas *Love* propagam-se em direções horizontais e transversais ao movimento da propagação horizontal.

Os sismómetros, de componente horizontal e vertical, apenas respondem às ondas descritas se apresentarem a sensibilidade direcional de acordo com a direção do movimento das partículas (Mussett & Khan, 2000).

III.1.5. Características sísmicas da Terra

É sabido que, as velocidades sísmicas da Terra aumentam com a profundidade excetuando uma zona a meia profundidade até ao centro onde esta diminui abruptamente. Quando há um aumento ou uma diminuição abrupta da velocidade é considerada uma descontinuidade de velocidade e, isto, marca a fronteira entre corpos com diferentes propriedades físicas sendo então conhecidos por de interfaces. Como entre o manto e o núcleo é possível identificar uma descontinuidade, é uma interface que os separa, que é por sua vez chamada de fronteira manto-núcleo.

A. Diferença Manto-Núcleo

Como já foi explicado anteriormente, as ondas S não se propagam em líquidos e como tal, o estudo destas ondas e das ondas P, indicam que a fronteira entre o manto e o núcleo separa estados físicos diferentes. Como as ondas S são propagadas no manto mas não no núcleo externo, isto indica-nos que o manto encontra-se no estado sólido, enquanto que o núcleo externo encontra-se no estado líquido. (Mussett & Khan, 2000).

B. Outras características sismológicas da Terra

A poucos quilómetros de profundidade a velocidade das ondas P diminui abruptamente o que fez com que se identificasse a presença de uma descontinuidade, a descontinuidade de *Moho*, que define a fronteira entre a crosta e o manto (Mussett & Khan, 2000). A cerca de 100 km de profundidade encontra-se a Zona de Baixa Velocidade (*Low Velocity Zone*) que representa uma diminuição gradual de velocidade ao contrário do esperado no avanço em profundidade. Esta zona varia de espessura, no entanto, não é encontrada por baixo de velhos cratões continentais. (Mussett & Khan, 2000).

A próxima descontinuidade deve-se a um aumento súbito de velocidade como consequência de uma quase certa reorganização de olivinas e piroxenas para formas mais compactas como resultado de um aumento da pressão entre os 400 km e os 660 km de profundidade que designa a “zona de transição” (Mussett & Khan, 2000).

Aos 660 km existe outra descontinuidade devido a outra possível alteração de fase, para materiais ainda mais compactos e cristalinos e separa a zona de transição e o manto inferior (Mussett & Khan, 2000).

C. Propagação das ondas

As amplitudes sísmicas variam por duas razões: (i) diminuição da amplitude, pois as frentes de onda espalham-se à medida que se afastam da fonte e por isso a energia tem que ser partilhada por uma área maior e (ii) devido à elasticidade das rochas, se estas não forem elásticas, a energia das ondas é absorvida o que diminui gradualmente a amplitude ao que se dá o nome de atenuação. No caso dos líquidos, há atenuação das ondas S, no entanto, as ondas P não são afetadas. O estudo da atenuação das ondas sísmicas pode ser usado para mapear a presença de magma sob os vulcões (Mussett & Khan, 2000).

D. Recetores Sísmicos

Quando uma onda sísmica passa em qualquer ponto da terra isto causa a oscilação do terreno. Assim, foram criados instrumentos, os recetores sísmicos, para conseguir captar e estudar as ondas sísmicas.

Há dois tipos de recetores, os Sismómetros e os Geofones. Um sismómetro tem que ser instalado de uma forma específica pois, estes são extremamente sensíveis e são usados para medir sinais fracos como é o caso da sismologia. Um sismómetro moderno pode até detetar movimentos causados por uma pessoa a andar a um quilómetro de distância ou outras pequenas perturbações (Mussett & Khan, 2000). São necessários três tipos de sismómetros para obter informações precisas sobre a oscilação do terreno: um sismómetro de componente vertical para medir oscilações verticais do terreno e dois sismómetros de componente horizontal para medir oscilações horizontais e segundo, duas direcções perpendiculares, normalmente, Norte-Sul e Este-Oeste (Mussett & Khan, 2000).

III.2. Efeitos de sítio e microzonamento

Desde sempre vários sismos revelaram-se catastróficos devido em grande parte à amplificação do movimento sísmico à superfície. Por vezes, a intensidade produzida por um sismo aumenta 1 ou 2 graus, devido aos efeitos de resposta de sítio. Regiões de sismicidade moderada podem sofrer amplificações do risco sísmico. Apesar da fraca energia inicial do movimento, produziram-se condições para a ocorrência de fenómenos de ressonância em certos terrenos onde as construções possuíam um período próprio próximo do período natural do solo (Victor, 2006).

Assim, a existência e variação da resposta de sítio pode condicionar a resposta da estrutura no caso de um evento sísmico. Deste modo, é necessário que os engenheiros conheçam a frequência natural do solo para que projetem a estrutura com uma frequência própria distinta (Victor, 2006).

Em qualquer contexto, os danos sofridos por uma estrutura estão associados, de uma forma bastante complexa, ao espectro de frequências de diversos elementos que intervêm na composição espectral do sinal sísmico e que agem como filtros. O sinal emitido por uma fonte sísmica é modificado primeiro devido às características de propagação na crosta e, seguidamente, pelas propriedades das camadas superficiais do solo; por último, à superfície o sinal é convolvido por diferentes fatores que estão relacionados com as propriedades das camadas mecânicas e dinâmicas da estrutura suprajacente (Victor, 2006).

Supondo que se pode associar a configuração geológica de um local a uma camada plana de determinada velocidade, assente sobre um substrato rígido de maior velocidade e sendo h a profundidade da interface, V_s a velocidade das ondas S da camada e T_0 o período natural, tem-se a seguinte fórmula:

$$T_0 = \frac{4h}{V_s}$$

Os modos normais de vibração de uma estrutura utilizam frequentemente fórmulas empíricas, do tipo:

$$T_i = \frac{N}{10}$$

Onde N é o número de andares e T_i o período do modo fundamental de vibração, ou o período próprio (Victor, 2006).

Estas duas expressões permitem compreender a importância do efeito do solo para o cálculo de dimensionamento das estruturas de modo a evitar-se o fenómeno de ressonância como acontece, por exemplo, na cidade do México, em 1985, e em Gediz Turquia em 1970 (Victor, 2006).

III.2.2 sismicidade da região do Porto

A sismicidade do território de Portugal continental decorre da sua localização geotectónica particular, a Norte da falha Açores-Gibraltar que constitui a fronteira entre a placa africana e a placa euroasiática (Noronha, 2005).

Neste contexto, o território continental está exposto aos sismos distantes, com origem no mar, na vizinhança da linha de fratura Açores-Gibraltar, de magnitude elevada e menores intervalos de recorrência (centenas de anos); e aos sismos próximos, com origem no continente, em regra de magnitude moderada a baixa, e elevados intervalos de recorrência (milhares de anos) (Noronha, 2005).

Segundo Noronha (2005), os registos da sismicidade histórica e instrumental mostram que a cidade do Porto se situa numa região de sismicidade moderada a baixa.

III.2.1. Potencial para a rotura sísmica das falhas à superfície

O potencial para a rotura sísmica de uma falha à superfície é um fator importante, na medida em que a maioria das estruturas não suporta eventuais deslocamentos de ordem decimétrica a métrica, impostos pelo movimento de uma falha no maciço de fundação. A localização de falhas ativas e o valor expectável do seu potencial deslocamento são, por isso, fatores que podem condicionar a implantação de edificações e de infraestruturas, nomeadamente das que tenham um desenvolvimento linear, como as vias de comunicação e as condutas enterradas de abastecimento de água, de gás natural, etc (Noronha, 2005).

A Carta Neotectónica de Portugal na escala 1: 1.000.000 indica a ocorrência na região da cidade do Porto de algumas falhas classificadas como "ativas prováveis" (Noronha, 2005).

A análise destes dados mostra tratar-se de uma sismicidade difusa, de magnitude moderada a baixa, característica de uma zona intra-placa, que não permite relacionar as fontes sísmicas com estruturas geológicas particulares (Noronha, 2005).

Apesar da Carta Neotectónica de Portugal indicar a ocorrência na cidade de falhas "ativas prováveis", é de notar que de acordo com os conhecimentos atuais, só os grandes sismos rompem à superfície, ou seja, a propagação da rotura e o deslocamento sísmico de uma falha à superfície do terreno, em regra só se verificam para sismos de magnitude superior a 6. Mais precisamente, um sismo de magnitude 6 tem uma probabilidade da ordem de 2% de romper à superfície, no caso de se tratar de uma falha inversa e de 5%, no caso de uma falha normal ou de desligamento horizontal (Noronha, 2005).

Segundo o registo da sismicidade instrumental, a magnitude máxima conhecida de sismos gerados na região do Porto é de 5,6 (Figura 17) (Noronha (2005)).

Por outro lado, considerando que as taxas de deslizamento sísmico das falhas ativas em Portugal se situam entre valores da ordem de 0,01 a 0,001 mm/ano, estima-se que um sismo de magnitude 6 teria na região do Porto um intervalo de recorrência entre 10 000 e 100 000 anos. O que significa que é muito reduzida a probabilidade de ocorrência de um sismo de magnitude 6 na região do Porto e ainda mais reduzida a probabilidade desse sismo provocar um deslocamento da respetiva falha à superfície (Noronha, 2005).

Esta análise permite concluir que o potencial para a rotura sísmica à superfície das falhas que ocorrem na área da cidade do Porto, é muito baixo, não constituindo, à primeira vista, um fator muito condicionante para o planeamento (Noronha, 2005).

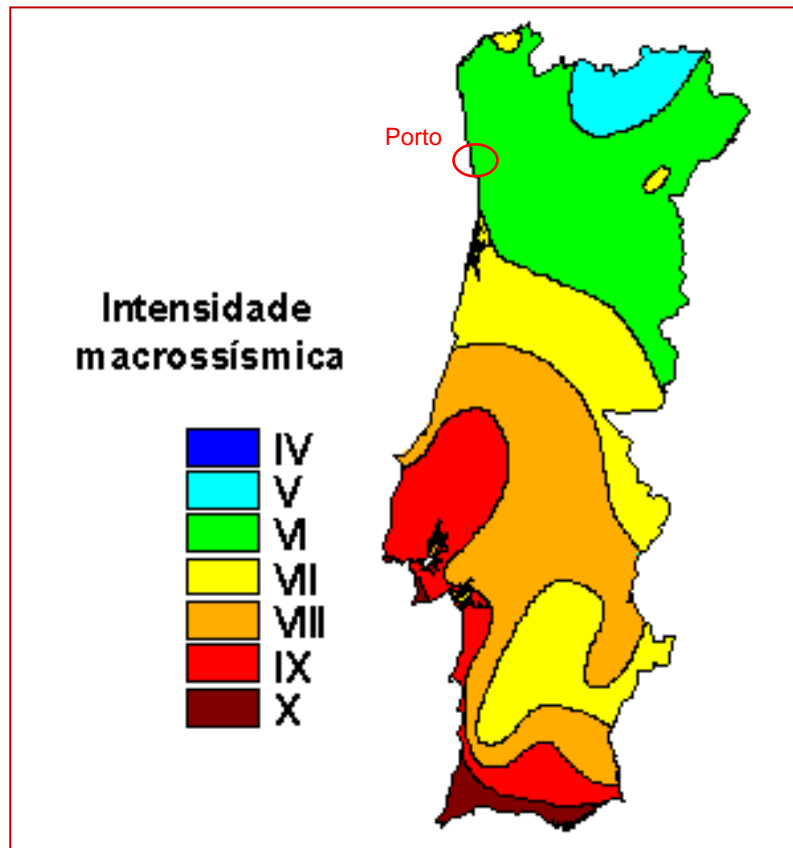


Figura 17 - Mapa de intensidade macrossísmica de Portugal.

CAPÍTULO IV

Metodologia e Resultados

IV.1. Método H/V – Conceitos teóricos

A terra está continuamente a ser afetada por ondas sísmicas, em que a sua origem pode provir tanto do vento e de tempestades oceânicas, com frequências menores que 0.3 Hz, como de atividades humanas com frequências superiores a 1 Hz. Estas ondas de baixa amplitude são referidas como sendo ondas sísmicas de ruído ambiental (Mendes Victor, 2006).

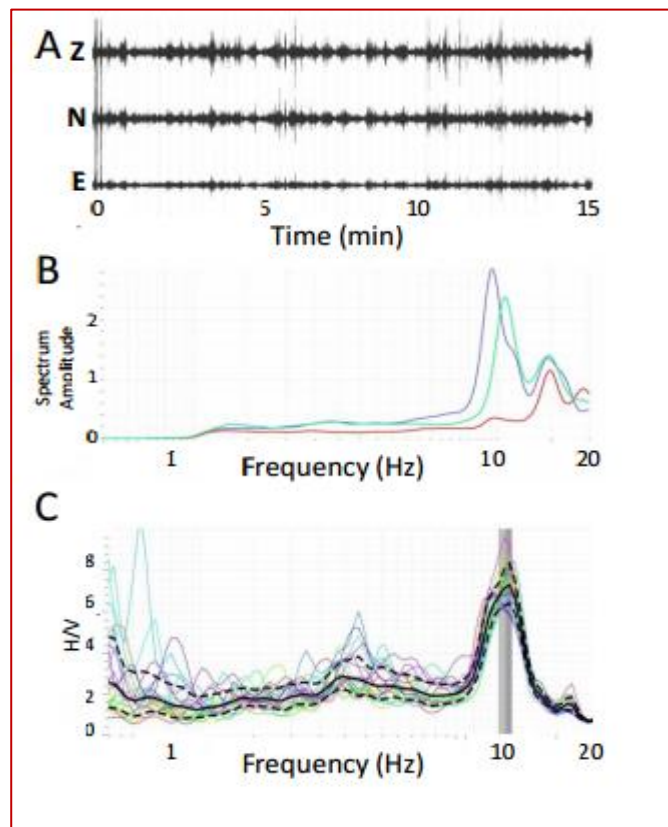


Figura 18 - A: Componentes Vertical, Norte e Este; B: Estimação do espectro de cada componente (azul e verde – horizontal; vermelho – vertical); C: Relação entre o espectro horizontal e vertical (H/V), que revela a frequência fundamental da ressonância f_0 10 Hz. (retirado de

http://www.geopsy.org/wiki/index.php/H/V_spectral_ratio#cite_note-3).

A gravação passiva das ondas sísmicas de ruído ou vibrações ambientais, está na base do método de H/V. Na figura 18 encontra-se representada uma gravação de ruído sísmico numa fração de 15 min obtidos dentro de uma caverna a 100 Hz de amostra, onde são visíveis 3 componentes: vertical (Z), horizontal N-S e horizontal E-W, respetivamente, onde se pode observar a vibração contínua do solo e as abruptas variações da amplitude. Como já foi referido anteriormente existem duas técnicas de maior relevo: razão espectral entre um registo efetuado no local e outro efetuado simultaneamente numa estação de referência, e a razão H/V (Mendes Victor, 2006).

A técnica H/V foi proposta inicialmente por Nagoshi em 1971, e mais tarde desenvolvida por Nakamura em 1989. Para Nakamura (1989) *in* Victor (2006) a resposta espectral da componente horizontal sobre a componente vertical (H/V) fornece, aproximadamente, a função de transferência para uma zona sedimentar. Os conceitos físicos passaram a ser explicados pelas propriedades físicas das camadas superficiais que condicionam as características de propagação (Mendes Victor, 2006).

Um exemplo da utilização da técnica H/V é-nos dada por um estudo de ruído sísmico, no Centro Histórico de Lagos (Mendes Victor, 2006), onde se elaborou a mesma metodologia, que permitiu, posteriormente, estimar as frequências naturais das camadas superficiais do solo, utilizando o método da estimativa H/V, proposto por Nakamura em 1989.

IV.1.1. Natureza do ruído sísmico

O solo vibra continuamente com velocidades variando entre 0,1 e 10 m/s dependente do local (Mendes Victor, 2006). O ruído sísmico pode ter duas origens distintas: natural e artificial (Mendes Victor, 2006). Consoante a sua origem, as suas características e, conseqüentemente o seu o seu comportamento, tanto no domínio espectral como no do tempo, vão ser diferentes.

O **ruído de origem natural** está relacionado com fenómenos naturais de grande escala. As perturbações atmosféricas e oceânicas geram ondulações de frequência entre 0,04 e 0.3 Hz. As ondas sísmicas geradas são registadas em qualquer ponto do globo a partir de 0,4 Hz.

O **ruído de origem artificial**, sobretudo em zonas urbanas, pode causar frequências elevadas (Mendes Victor, 2006).

Na tabela 1 encontra-se sintetizada a informação que relaciona as origens do ruído e a frequência que cada um pode apresentar.

Tabela 1 - Origem dos ruídos e a sua frequência.

FREQUÊNCIA	ORIGEM DOS RUÍDOS
<0,5 Hz	Devido a perturbações oceânicas e atmosféricas de grande escala.
≈ 1 Hz	Devido ao vento e a condições meteorológicas locais.
>1 Hz	Devido às atividades humanas.

IV.1.2. Definição da resposta H/V

Em 1989, Nakamura verificou que fontes próximas, como por exemplo, um comboio, alterava consideravelmente o espectro do ruído sísmico. Para destacar a informação relativa ao efeito de sítio, extinguido de ruídos “parasitas”, Nakamura decidiu comparar os espectros das componentes horizontais e verticais do ruído sísmico registado numa mesma estação, sabendo que o ruído é composto por ondas superficiais e ondas de volume geradas por diversas fontes, e sabendo que as ondas superficiais *Rayleigh* são compostas por ondas de compressão (P) e de corte (S) (Mendes Victor, 2006)

Na sua formulação Nakamura considerou os seguintes conceitos:

1. Conhecendo os modos de propagação dos diferentes tipos de onda, pode considerar-se que aproximadamente, o movimento horizontal resulta de ondas (S), e o movimento vertical depende das ondas (P).
2. Na base dos sedimentos, admite-se que o sinal da componente horizontal é proporcional ao da componente vertical.
3. Nas frequências de interesse para o estudo realizado, o ruído sísmico “útil” (que contém a informação), provém principalmente de reflexões e refrações das ondas S nas camadas da sub-superfície.

A partir dos três conceitos descritos anteriormente, Nakamura chegou à definição de uma pseudo-função de transferência que caracteriza o comportamento dinâmico da camada superficial do solo e, que é definida pela razão espectral entre o movimento horizontal e o movimento vertical registados á superfície e, sinteticamente, designado por H/V (Mendes Victor, 2006).

Se o nível de amplificação espectral do ruído fosse próximo do nível registado em sismos, a pseudo-função de transferência obtida por este método (H/V), seria idêntica á função de transferência definida pelo método clássico.

Este método foi utilizado com sucesso em várias cidades (S. Francisco, México, Caracas, Filipinas, entre outras, (Mendes Victor, 2006)) por diferentes equipas de investigadores. Contudo, nem sempre o método fornece resultados satisfatórios devido, provavelmente ao facto de se utilizarem movimentos de pequena amplitude (ruído sísmico) para estimar a resposta das camadas superficiais a movimentos de grande amplitude (sismos fortes). (Mendes Victor, 2006).

IV.2. Método H/V – Procedimento Experimental

IV.2.1. Processamento de dados

O processamento dos dados foi efectuado de acordo com a Metodologia proposta por Nakamura (1989) *in* Victor (2006), de modo a obter-se a razão espectral H/V. Assim, um espectro é uma transformação matemática que analisa sinais periódicos, e os decompõe em sinais periódicos fundamentais. Para tal, utilizou-se o software *Geopsy*© o qual permite obter a razão entre os espectros das componentes horizontais e verticais da vibração do ruído, e consequentemente, obter espectros H/V para a posterior análise. Para o processamento dos dados no *Geopsy*©, é necessário preencher certos requisitos, tais encontram-se enunciados seguidamente:

- Obter 3 sinais: Norte-Sul, Este-Oeste e vertical;
- Ensaio com tempo suficiente para serem processados corretamente.
- Importar os ficheiros num formato próprio

Após a introdução dos dados e a consequente obtenção dos espectros para cada ensaio, procedeu-se a uma análise e interpretação dos resultados. Seleccionaram-se os picos máximos da razão H/V, num determinado intervalo de frequências, isto é, seleccionou-se, para cada ponto a frequência para a qual a amplitude da razão é máxima. Esta frequência de pico, corresponde à frequência em torno da qual se concentra a maior parte da energia e é denominada por frequência predominante, ou frequência dominante (Mendes Victor 2006).

De um modo geral, as frequências próprias dos solos são inferiores a 10 Hz, só para formações rochosas muito duras é que geralmente se observam frequências dominantes superiores (Mendes Victor 2006). Por este motivo, os picos de frequência mais elevada deverão ser interpretados cuidadosamente e poderão estar associados à actividade de máquinas industriais, ou poderão estar relacionados com a heterogeneidade do subsolo muito localizadas. Para uma interpretação mais directa do comportamento do solo utilizam-se as frequências dominantes de cada local. A interpretação destas frequências deve ser efetuada tendo em conta a geologia superficial e topografia local.

A geologia superficial do Porto, mais propriamente da zona Boavista-Foz, de acordo com a carta geotécnica do Porto (2ª edição, 2003), está caracterizada por diversas unidades que registam diferentes evoluções tectonometamórficas e que apresentam litologias diversas, mas de entre as quais se destacam frequentemente ortognaisses de diferentes tipos, anfibolitos e metassedimentos. Teixeira (1970) *in* Carta geotécnica do Porto (2ª edição, 2003), considerou também que esta zona correspondia a uma zona de contacto entre um granito porfiróide e rochas gnáissico-migmatíticas e, que estas últimas, pertenciam ao conjunto por ele designado de “Granito do Porto” instalado, provavelmente, entre o Precâmbrico e o Câmbrico.

Na Figura 19 apresenta-se um exemplo de um gráfico espectral obtido através do processamento de dados no *Geopsy*®, em que podemos observar a curva H/V e as suas componentes.

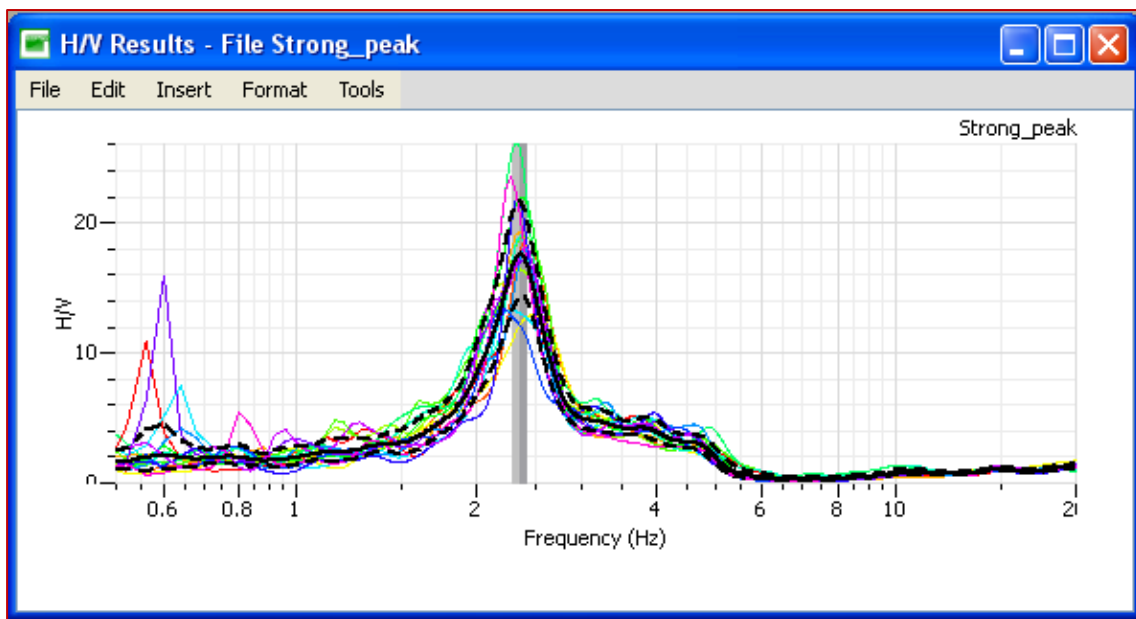


Figura 19 - Exemplo de gráfico espectral H/V obtido através do Geopsy®.

No gráfico representado anteriormente, podemos observar várias curvas com cores diferentes, em que cada curva representa uma janela de ruído (Figura 20) selecionada automaticamente para a criação do espectro através dos dados de gravação obtidos em campo. A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais. As duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

A área a cinzento na vertical, representa a média da frequência fundamental e o seu desvio padrão.

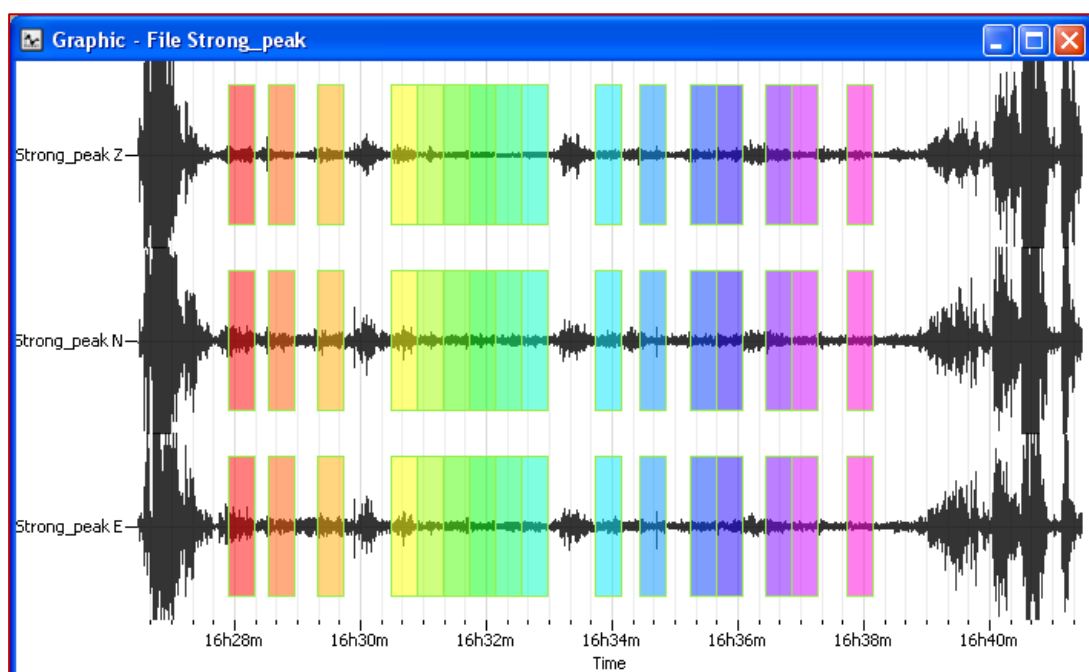


Figura 20 - Janela de ruído representativo do gráfico apresentado na figura 19.

O valor da frequência encontra-se no limite da zona de passagem de cinzento claro para cinzento-escuro, como se pode verificar na Figura 22.

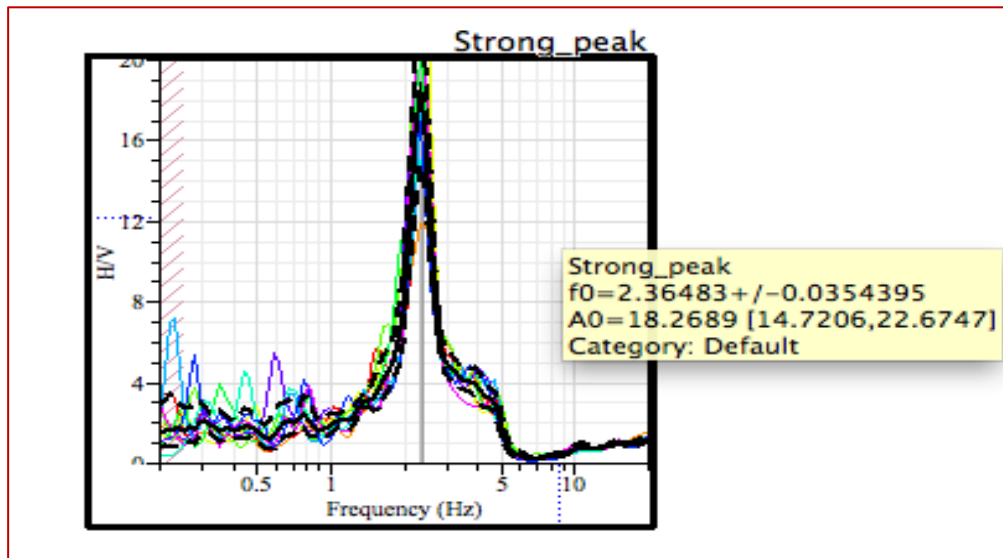


Figura 22 - Representação da obtenção da frequência fundamental do espectro H/V (retirado de http://www.geopsy.org/wiki/index.php/H/V_spectral_ratio#cite_note-3).

IV.2.2. Recolha de dados *in situ*

A recolha de dados em campo consistiu em 12 ensaios de 15 min (cada) na Avenida da Boavista no sentido rotunda da Boavista - Castelo do Queijo. Segundo a carta geotécnica apresentada na Figura 23, cada tonalidade corresponde a uma unidade geotécnica diferente, sendo que, cada ponto terá a sua respectiva unidade e efetivamente a sua frequência fundamental estará diretamente relacionada com as características dessa unidade.

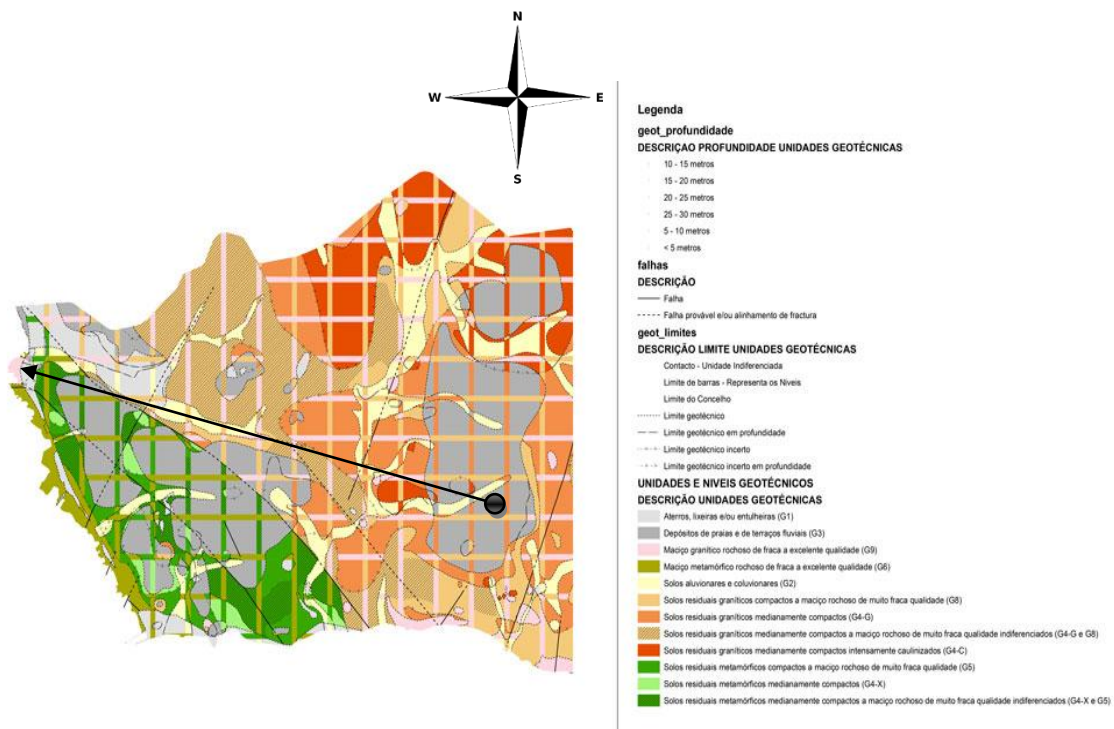


Figura 23 - Direcção da recolha dos ensaios na carta geotécnica do Porto (extrato da Carta Geológica - Carta Geotécnica do Porto 1: 10 000; *adapt. Noronha et al., 2003*).

Os ensaios foram realizados utilizando um sismómetro SR04 Geobox (Figura 24) para gravar os sinais de ruído ambiente nas componentes Vertical (Z), Norte-Sul (N) e Este-Oeste (E), utilizando o software *Seismowin*® para adquirir a informação obtida e transformá-la num ficheiro SAF para poder ser lido e, conseqüentemente, analisado pelo *Geopsy*® para se obter os gráficos e espectros finais. Os sensores sísmicos deste sistema tem uma frequência característica de 2 Hz, ou seja tratam-se de sensores de frequência relativamente baixa para este tipo de ensaios onde actualmente se usam sistemas entre 1 e 5 Hz.

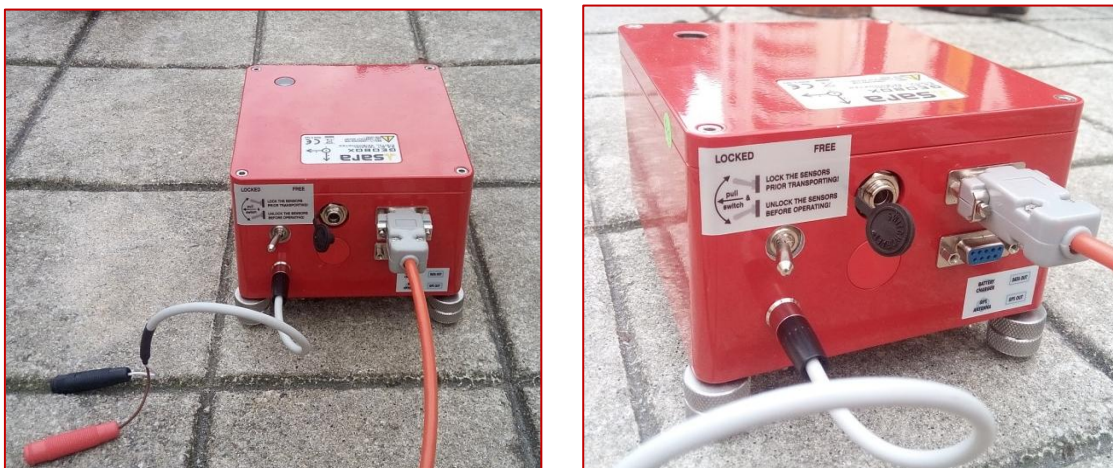


Figura 24 – Sismómetro SR04 Geobox.

- Itinerário das medições in situ**

Tabela 2 - Dados correspondentes aos locais de medição utilizando o método H/V.

ID	Morada	Coordenadas GPS	
		Latitude	Longitude
Ponto 1	Rua de Agramonte 179-307, Porto	N41°9'26"	W8°38'0.5568"
Ponto 2	Rua de António Patrício, Porto	N41°9'30.222"	W8°38'19.2552"
Ponto 3	Rua de António Cardoso, Porto	N41°9'31.374"	W8°38'27.474"
Ponto 4	Avenida da Boavista 1563, Porto	N41°9'35.6652"	W8°38'31.794"
Ponto 5	Avenida da Boavista 1745, Porto	N41°9'36.0828"	W8°38'39.1668"
Ponto 6	Avenida da Boavista 2112, Porto	N41°9'40.95"	W8°38'54.0492"
Ponto 7	Rua São João de Brito 9, Porto	N41°9'42.7896"	W 8°39'5.886"
Ponto 8	Avenida da Boavista 3302, Porto	N41°9'49"	W 8°39'44"
Ponto 9	Rua de António Aroso 17, , Porto	N41°9'54.9324"	W 8°40'15.5604"
Ponto 10	Avenida da Boavista 4599, Porto	N 41°9'58.086"	W 8°40'38.0064"
Ponto 11	Avenida da Boavista 5036, Porto	N 41°10'2.2728"	W 8°41'3.1208"
Ponto 12	Praça de Gonçalves zarco, 70, Porto	N41°10'5.3184"	W 8°41'18.2652"

No mapa seguinte, encontra-se representada a localização exata dos ensaios na carta geotécnica do Porto, que permitiram analisar mais pormenorizadamente as frequências dominantes obtidas.

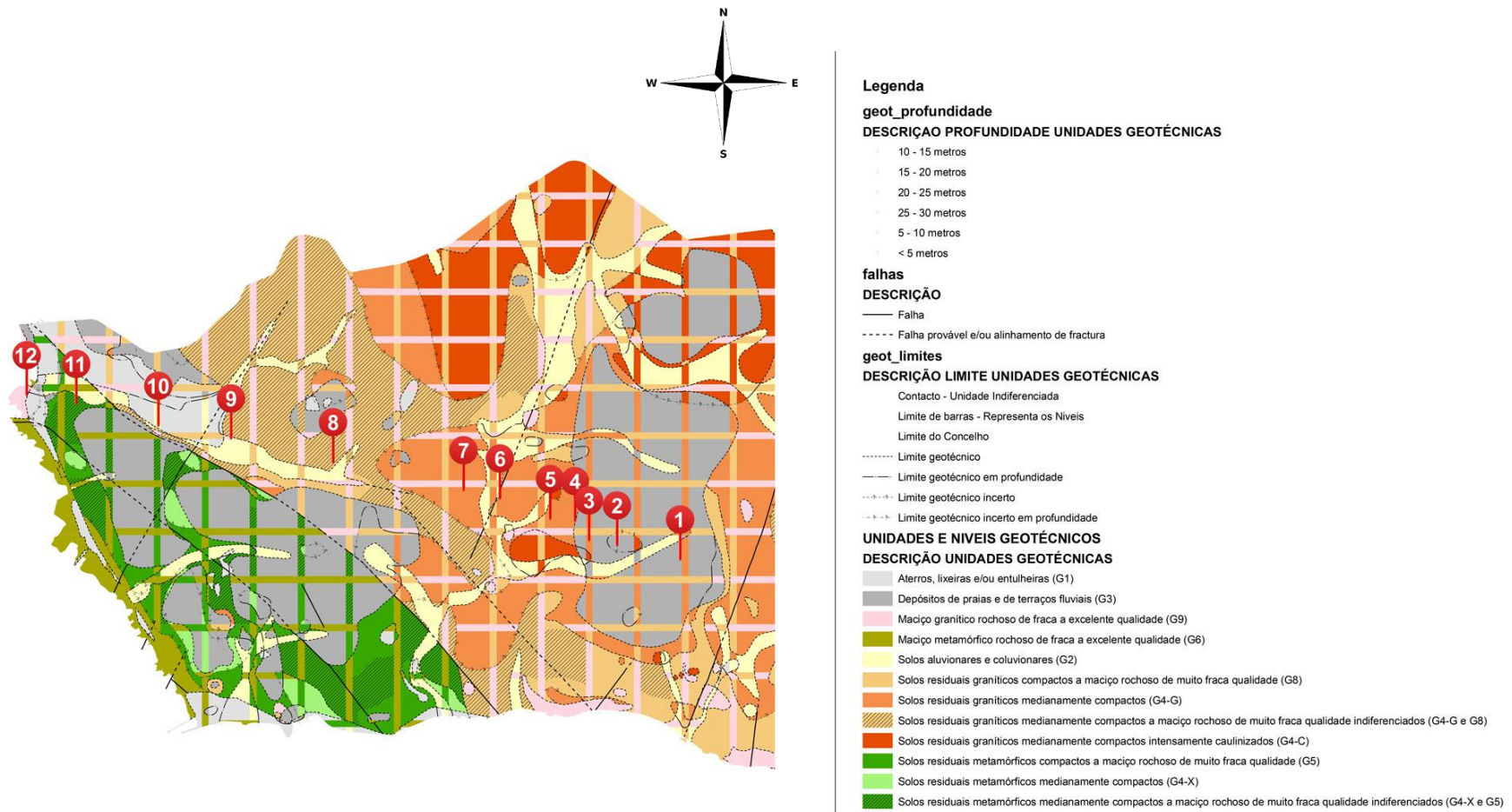


Figura 25 - Disposição geográfica dos pontos onde foram efetuadas medições na carta geotécnica do Porto.

IV.2.3. Unidades Geotécnicas

Como se pode observar na Figura 25, os 12 pontos de ensaios foram dispostos geograficamente sensivelmente no sentido Este-Oeste, sobrepassando por várias unidades geotécnicas.

Nestas unidades utilizaram-se os critérios que tiveram como base, as especificações da Associação de Engenharia e do Ambiente, AIGE (1981), que considera os seguintes aspectos:

- Identificação do tipo litológico (com base nas propriedades petrográficas);
- Descrição das propriedades das rochas e solos (com base na cor, textura, dimensão de partículas, grau de alteração, compacidade ou consistência e resistência);
- Descrição das propriedades dos maciços necessárias à descrição do seu comportamento (com base na estrutura, descontinuidades e perfil de alteração).

Em termos de representação gráfica (Figura 25) das unidades definidas, utilizou-se, para representar os níveis não aflorantes, o método das barras ortogonais, em que as barras verticais e horizontais representam, respectivamente, um primeiro e um segundo nível abaixo da superfície. Considerou-se ainda, sempre que possível, a profundidade de ocorrência dos vários níveis representados, tendo-se para tal definido uma série de classes a que correspondem diferentes intervalos de profundidade de ocorrência, como se apresenta no quadro seguinte.

Tabela 3 Profundidade das unidades geotécnicas.

Classes	Profundidade
I	0 – 5 m
II	5 – 10 m
III	10 – 20 m
IV	20 – 25 m
V	25 – 30 m
VI	30 – 35 m

Com base nos critérios referidos acima, consideram-se no total 10 unidades geotécnicas que se encontram resumidas no quadro seguinte. Em algumas dessas unidades consideram-se ainda subunidades. Estas subunidades encontram-se identificadas, sempre que possível, nos registos de sondagens e ensaios compilados e que constam na base de dados GEODATA.

Tabela 4 - Unidades geotécnicas consideradas.

	Unidades Geotécnicas	Descrição	Subunidades Geotécnicas	Descrição
Depósitos Recentes	G1	Aterros	-	-
	G2	Solos aluvionares e coluvionares	-	-
	G3	Depósitos de praias e de terraço	-	-
Formações Metamórficas	G4-X	Solos residuais medianamente compactos	-	-
	G5	Solos residuais compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade	G5-A	Solos residuais compactos a muito compactos
			G5-B	Solos residuais muito compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade
	G6	Maciço rochoso de fraca a excelente qualidade	-	-
Formações Graníticas	G4-C	Solos residuais medianamente compactos e intensamente caulinizados	-	-
	G4-G	Solos residuais medianamente compactos	-	-
	G8	Solos residuais compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade	G8-A	Solos residuais compactos a muito compactos
			G8-B	Solos residuais muito compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade
	G9	Maciço rochoso de fraca a excelente qualidade	G9-A	Maciço rochoso de fraca a razoável qualidade
			G9-B	Maciço rochoso de boa a excelente qualidade

IV.2.4. Resultados obtidos no *Geopsy*©

Após a introdução dos respectivos ficheiros SAF de cada ponto no software *Geopsy*©, obtivemos os resultados patentes nas figuras 26 a 49. Em cada local representamos a série temporal, com a subdivisão em janelas de tempo individuais com cores diferentes, e o respectivo resultado obtido da análise H/V. A qual, como descrito no capítulo IV 1 corresponde à respectiva razão espectral.

Ponto 1 - Rua de Agramonte 179-307, Porto

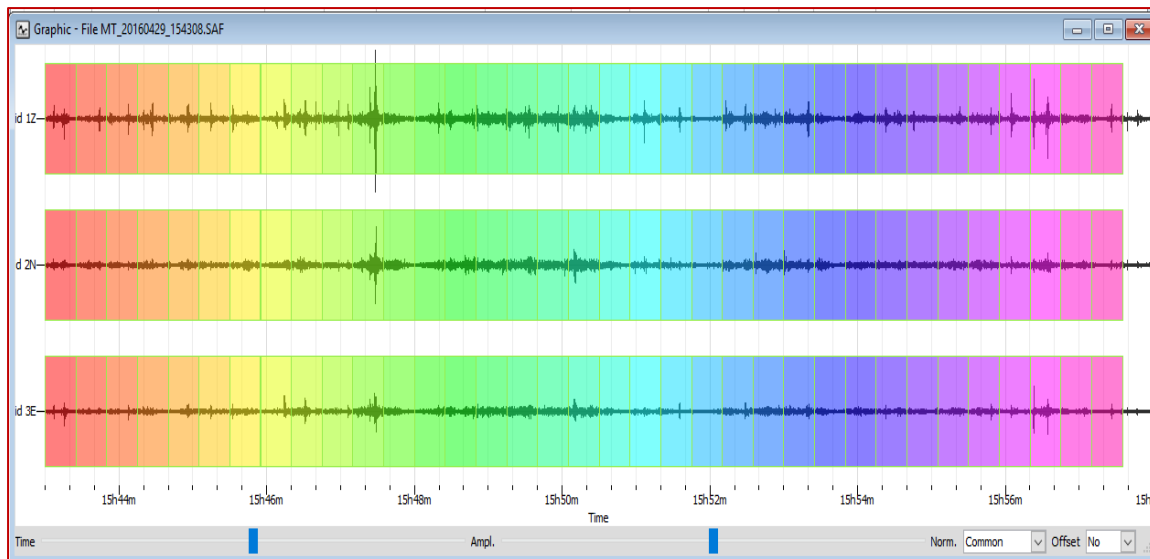


Figura 26 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 1.

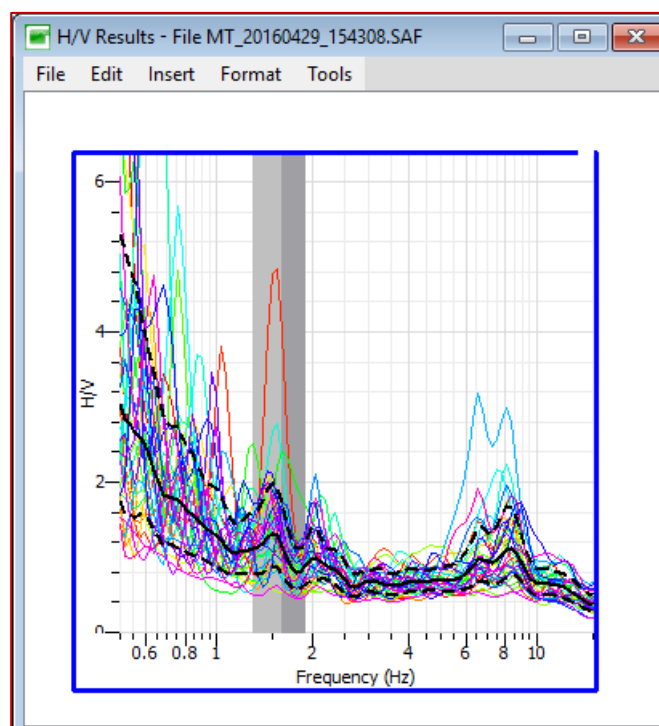


Figura 27- Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 26). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

Ponto 2 - Rua de António Patrício, Porto

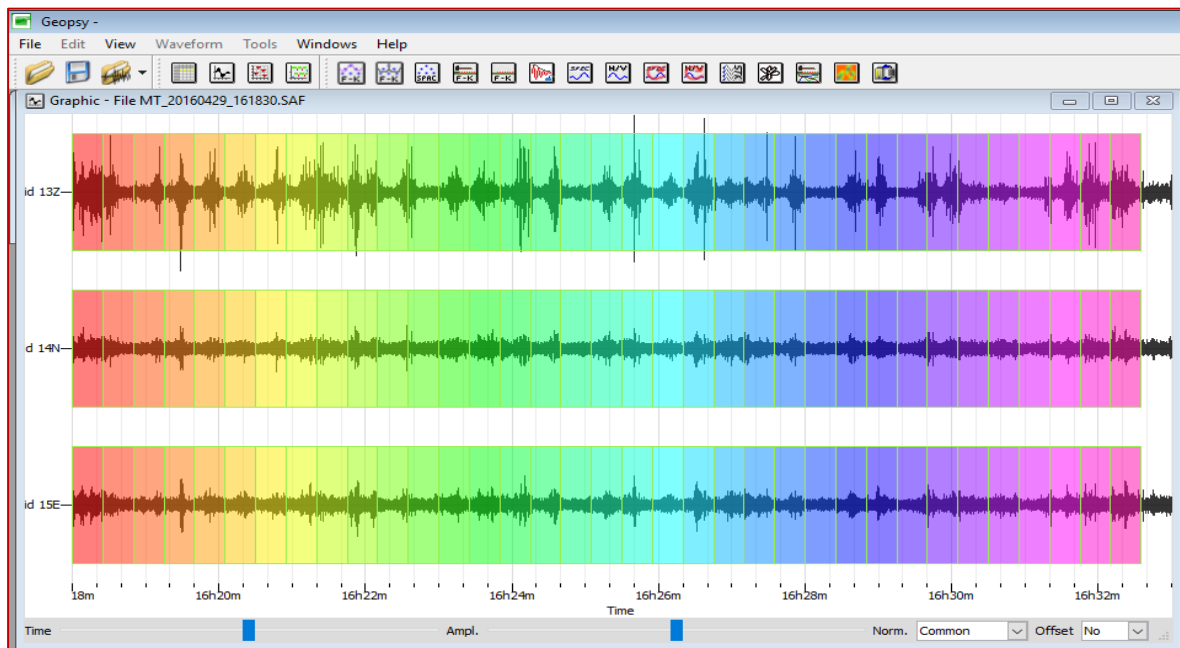


Figura 28 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 2

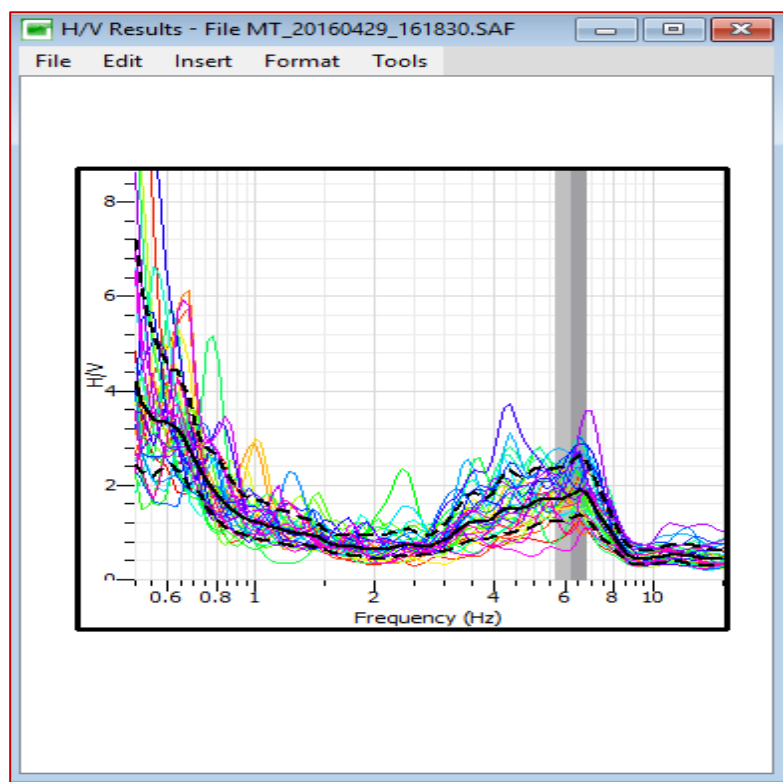


Figura 29 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 28). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

Ponto 3 - Rua de António Cardoso, Porto

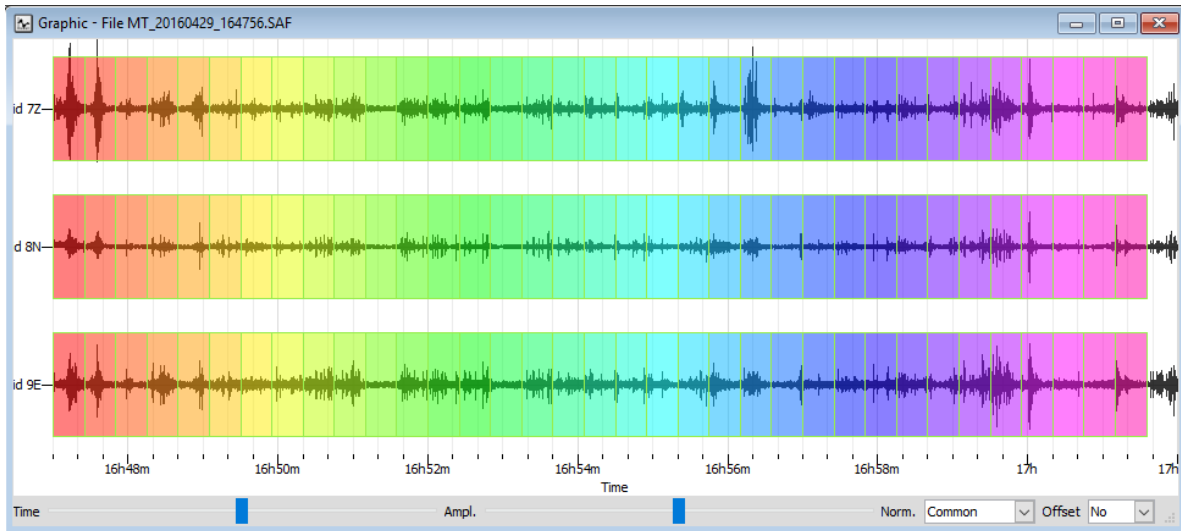


Figura 30 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 3.

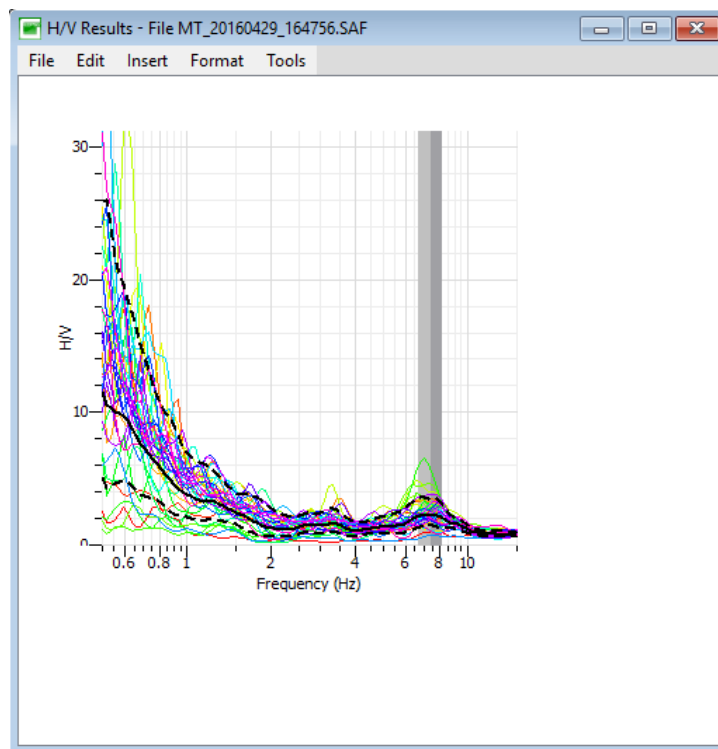


Figura 31 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 30). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão

Ponto 4 - Avenida da Boavista 1563, Porto

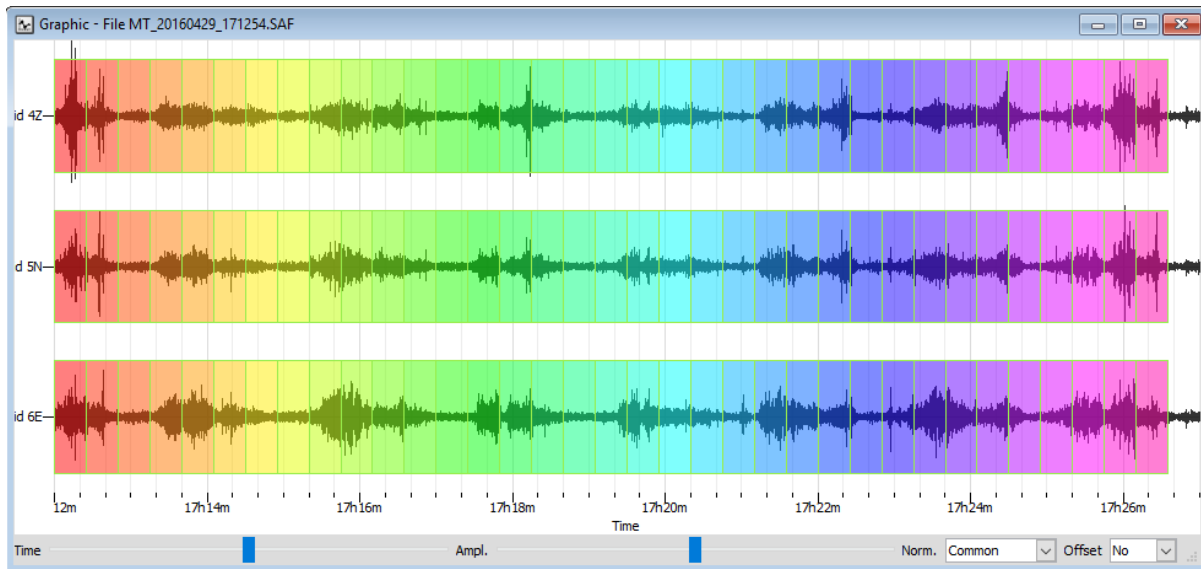


Figura 32 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 4.

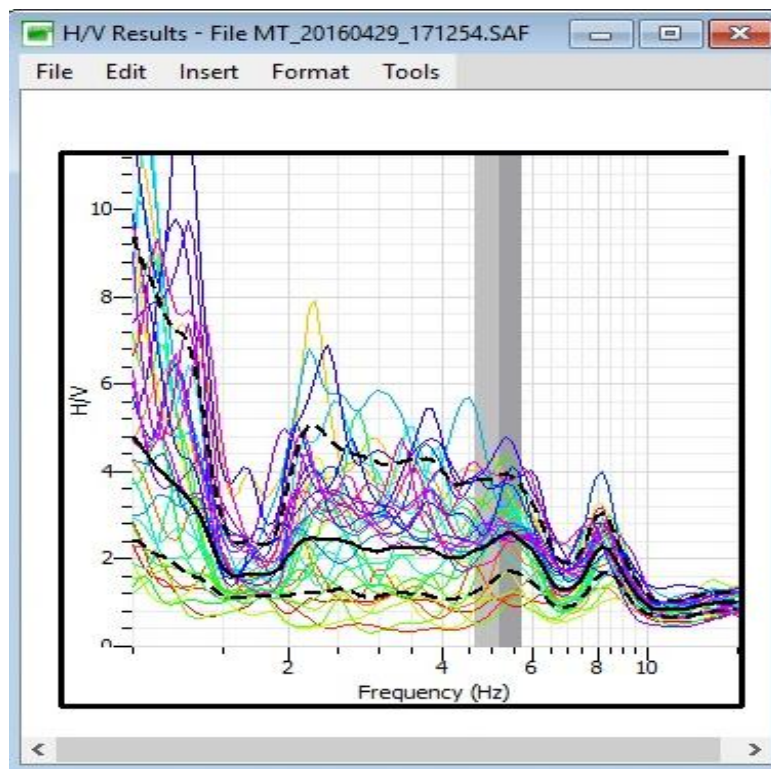


Figura 33 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 32). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

Ponto 5 - Avenida da Boavista 1745, Porto

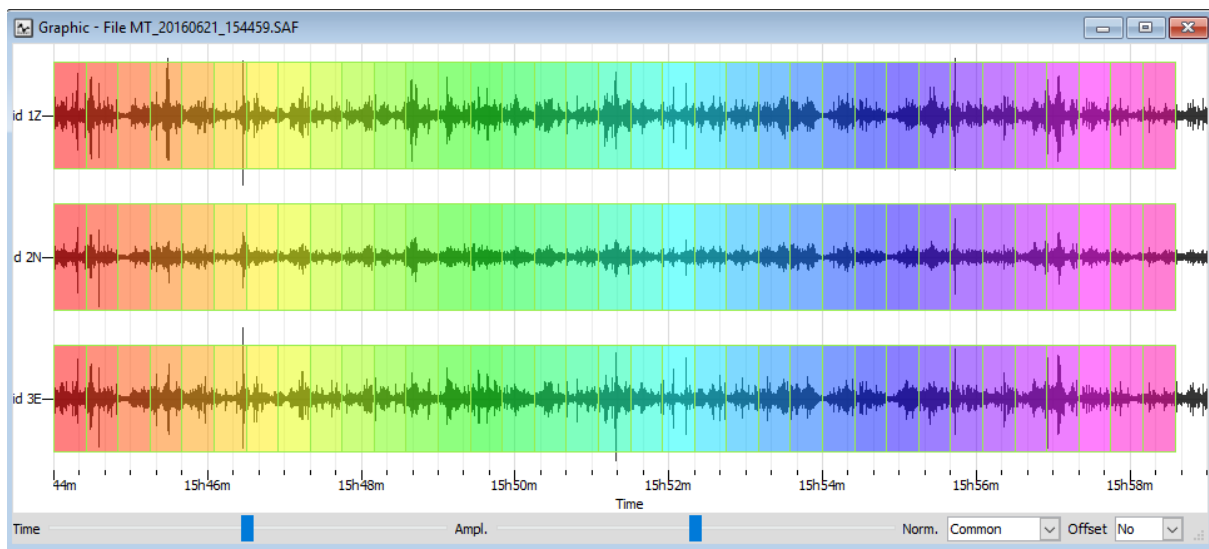


Figura 34 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 5.

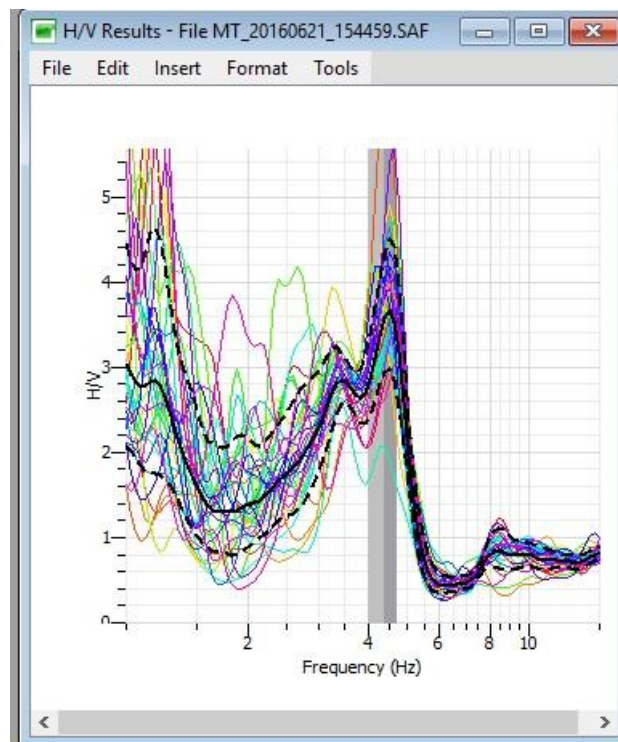


Figura 35 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 34). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

Ponto 6 - Avenida da Boavista 2112, Porto

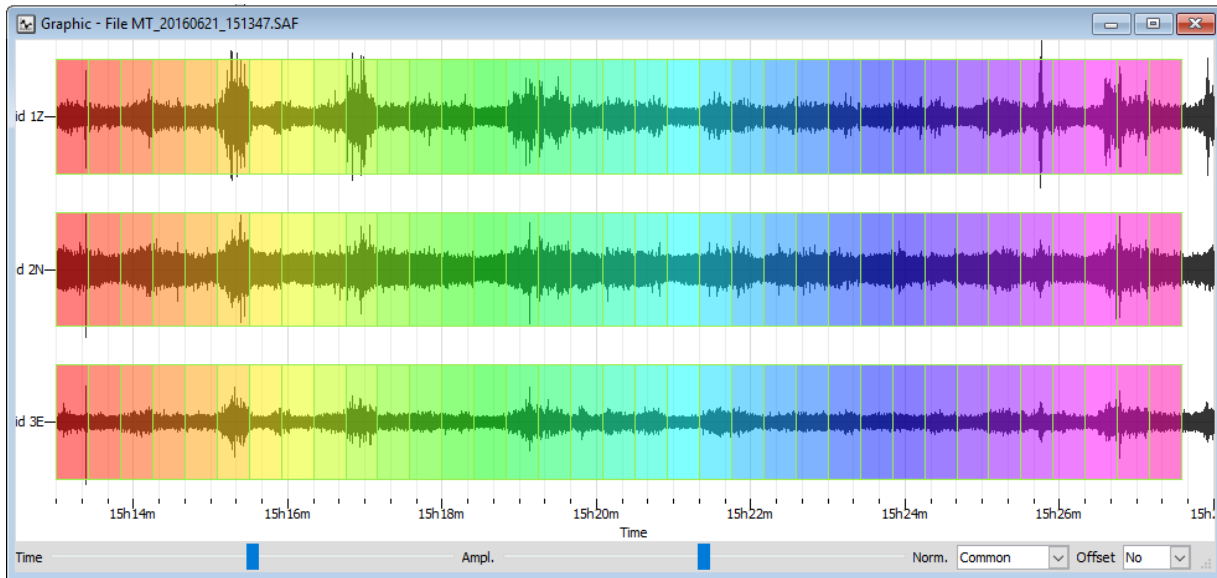


Figura 36 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 6.

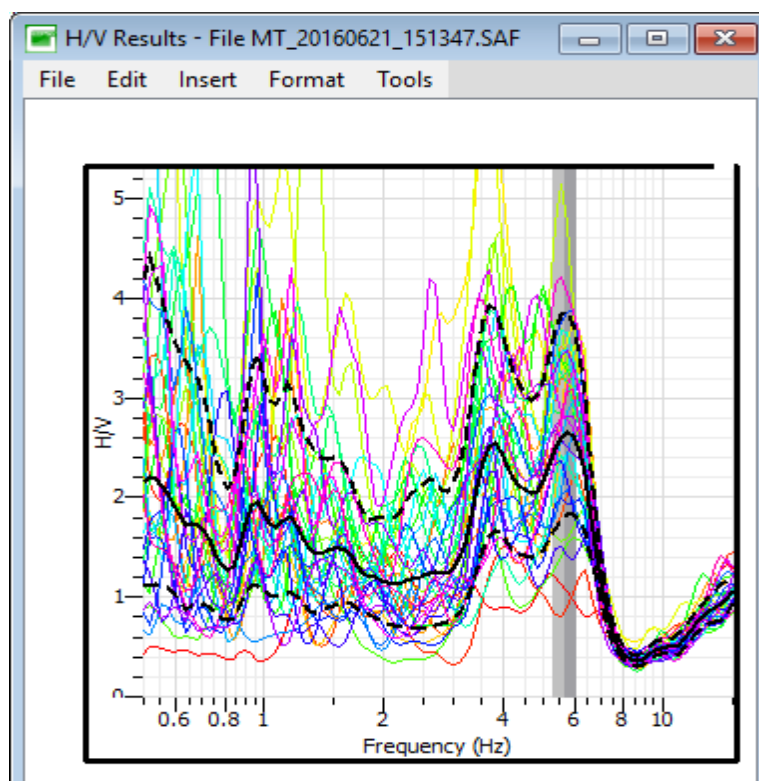


Figura 37 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 36). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

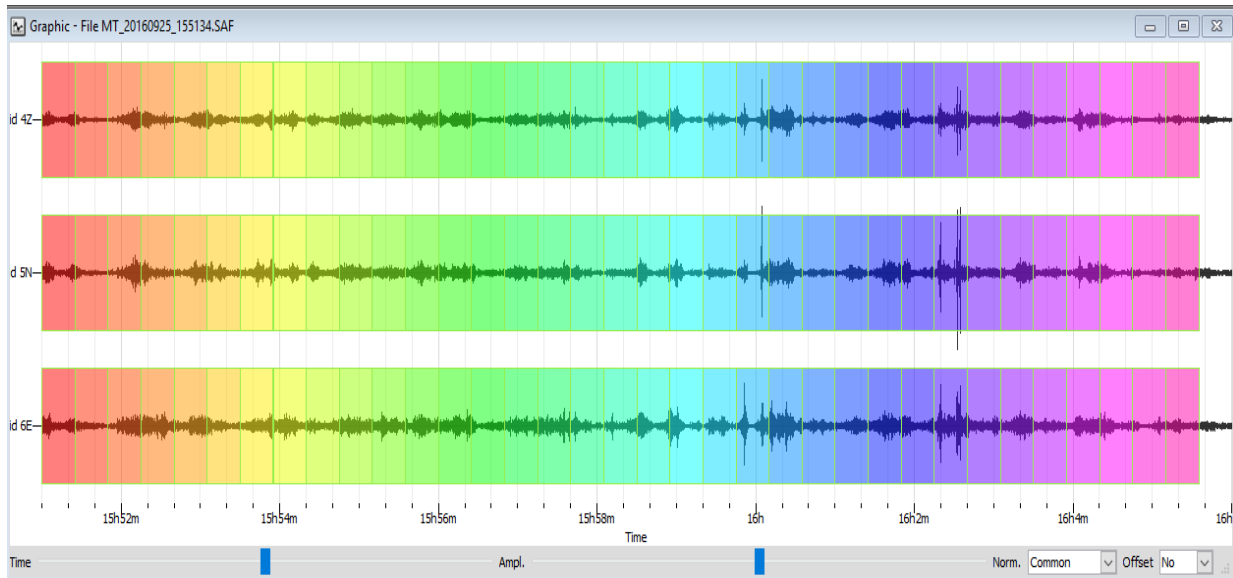
Ponto 7 – Rua São João de Brito 9, Porto.

Figura 38 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 7.

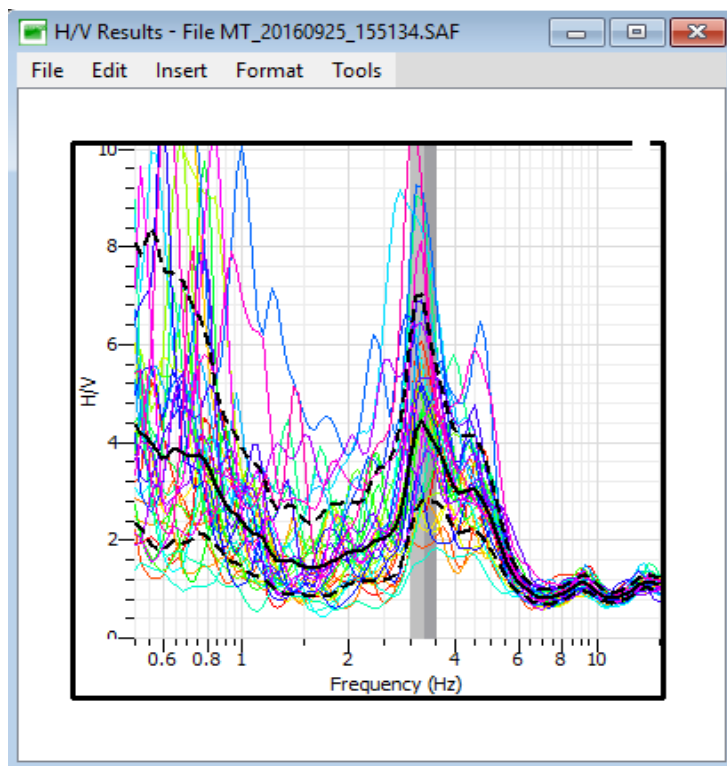


Figura 39 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 38). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

Ponto 8 – Avenida da Boavista 3302, Porto.

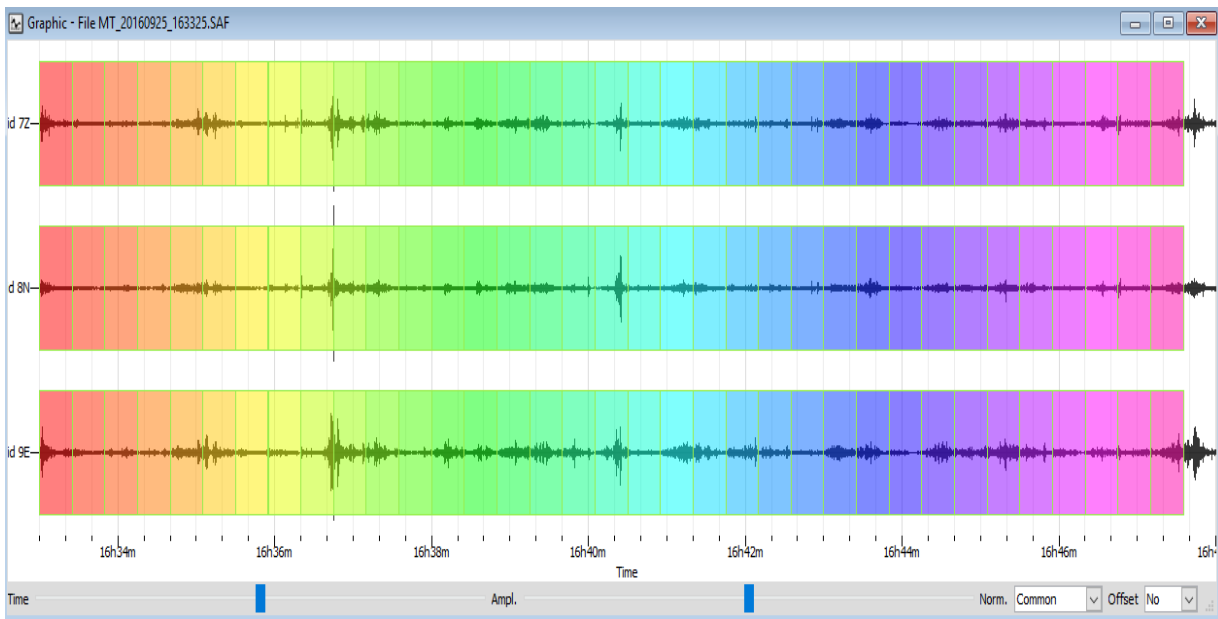


Figura 41 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 8.

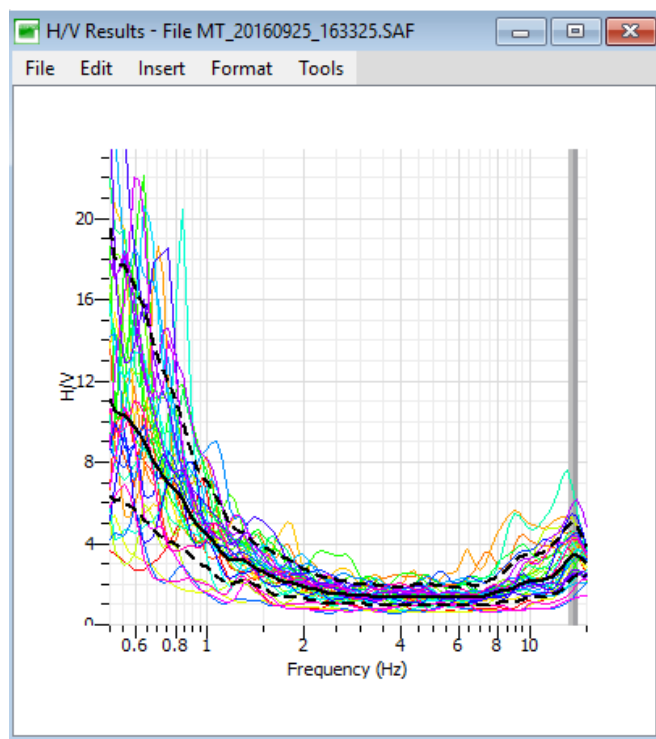


Figura 40 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 40). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

Ponto 9 - Rua de António Aroso 17, Porto

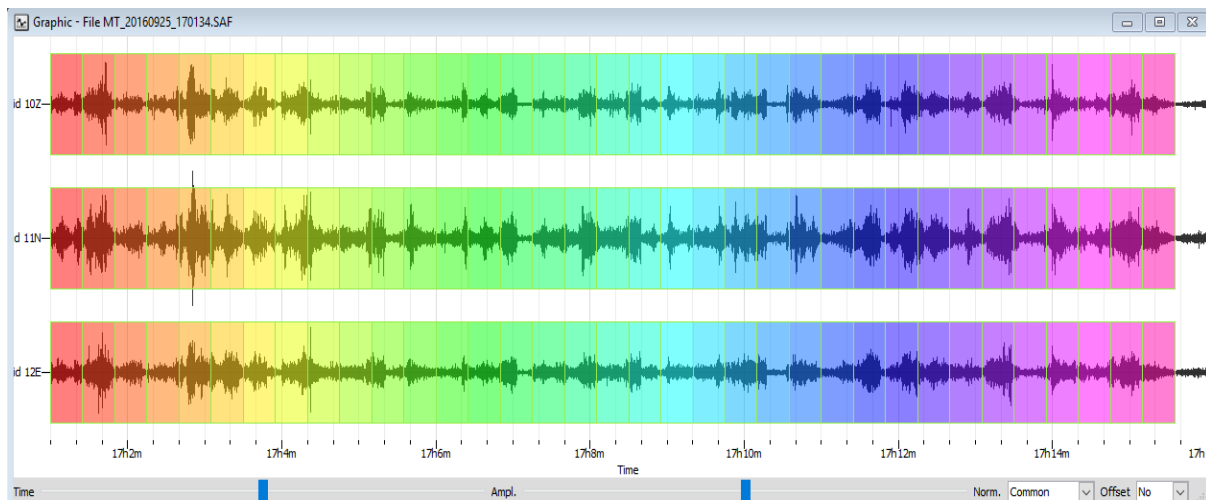


Figura 42 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 9.

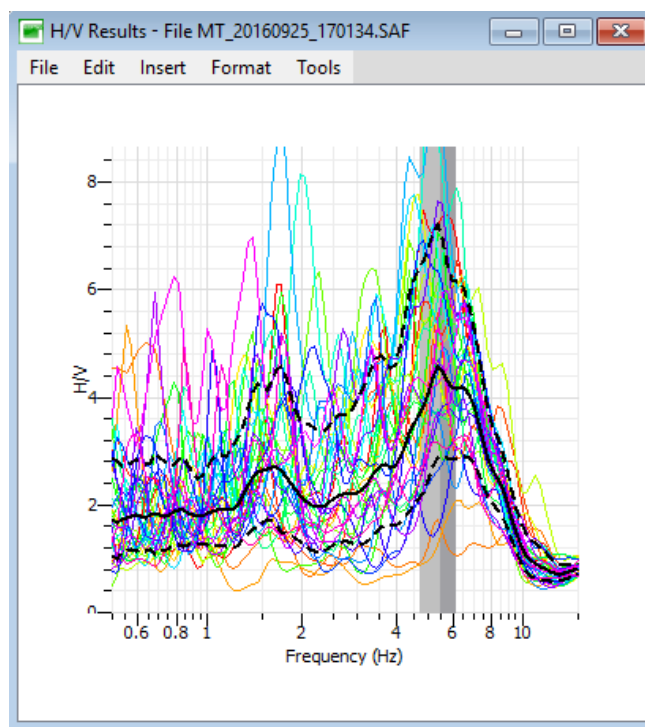


Figura 43 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 42). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

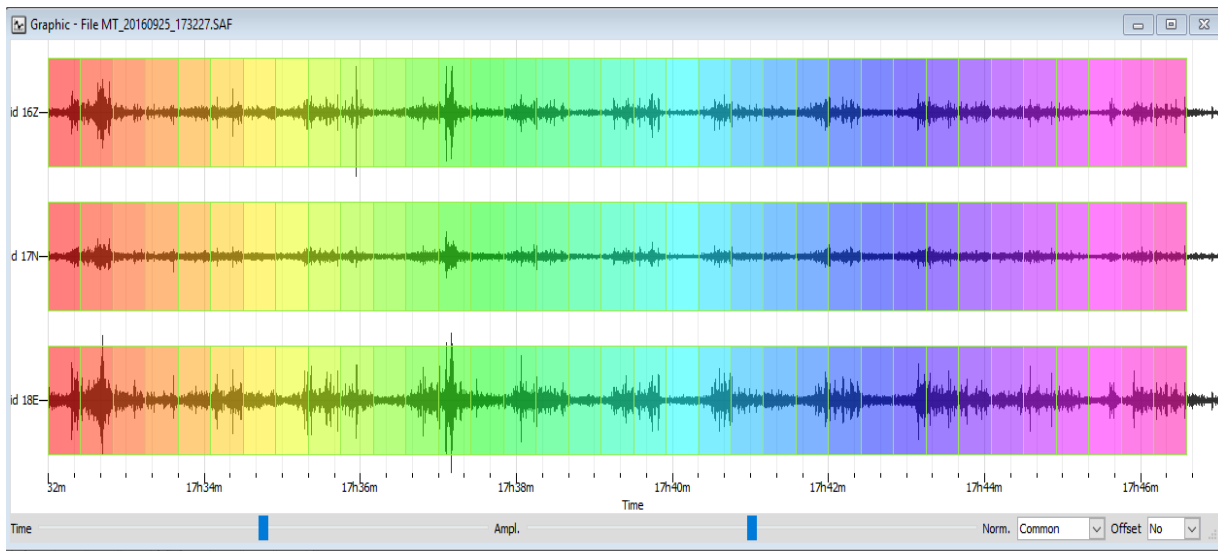
Ponto 10 - Avenida da Boavista 4599, Porto.

Figura 44 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 10.

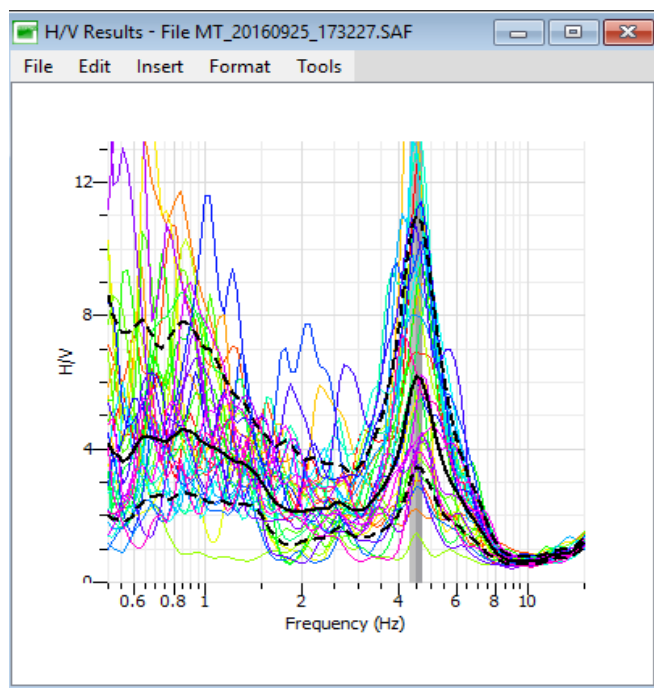


Figura 45 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 44). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

Ponto 11 - Avenida da Boavista 5036, Porto.

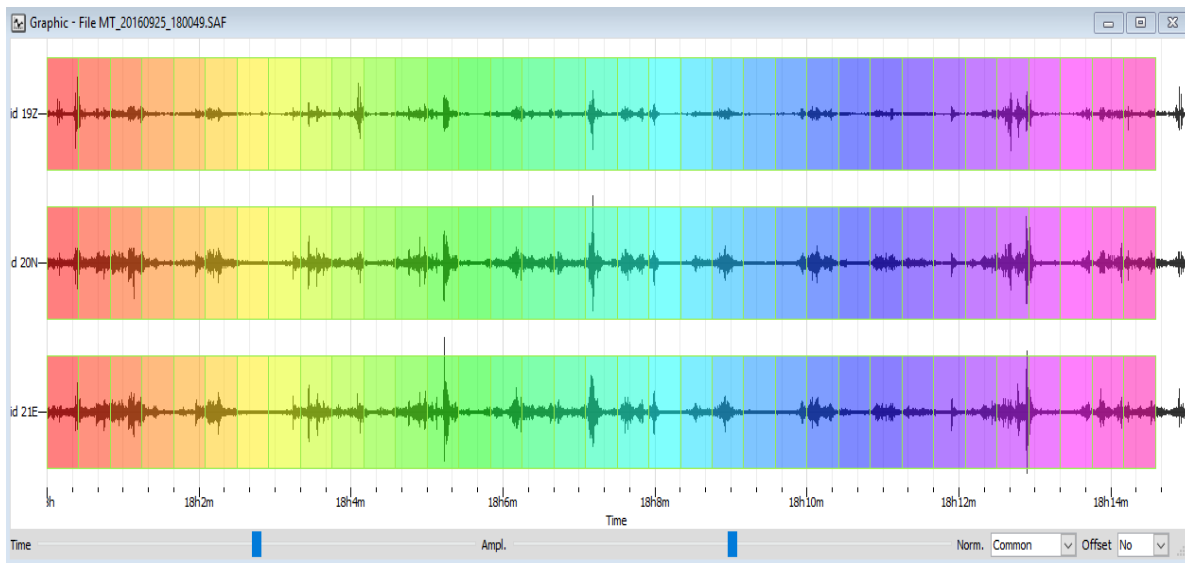


Figura 46 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com gradação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 11.

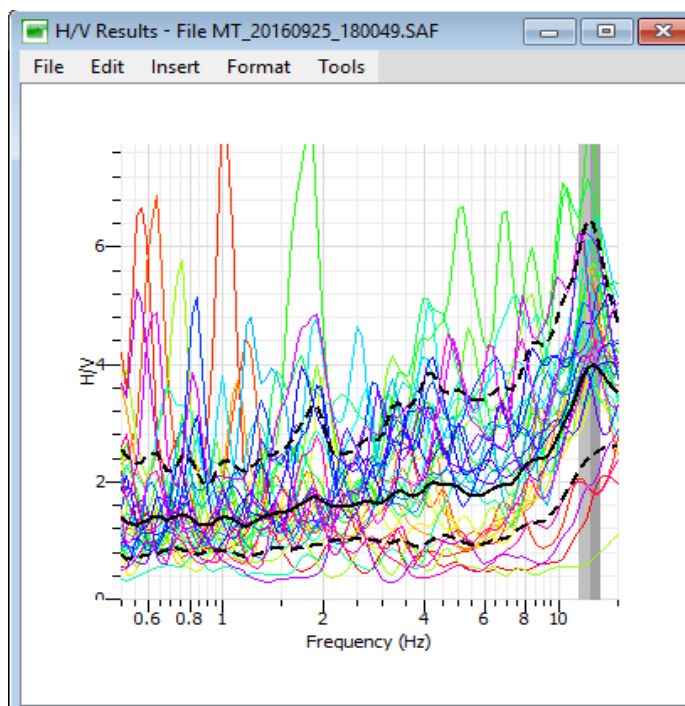


Figura 47 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 46). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

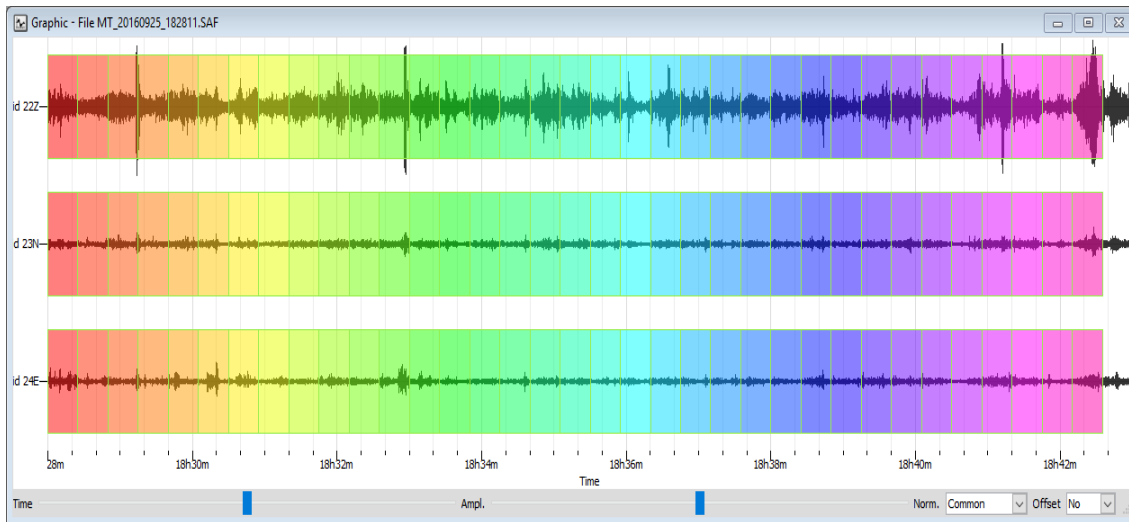
Ponto 12 - Praça Gonçalves Zarco 70, 4100 Porto.

Figura 48 - Gráfico que relaciona três as séries temporais, respectivamente, do topo para a base, as componentes: vertical, Norte-Sul horizontal, e Este-Oeste horizontal. Apresenta uma divisão em 35 janelas com graduação de cores, correspondente à gravação das vibrações do ruído para o ponto 12.

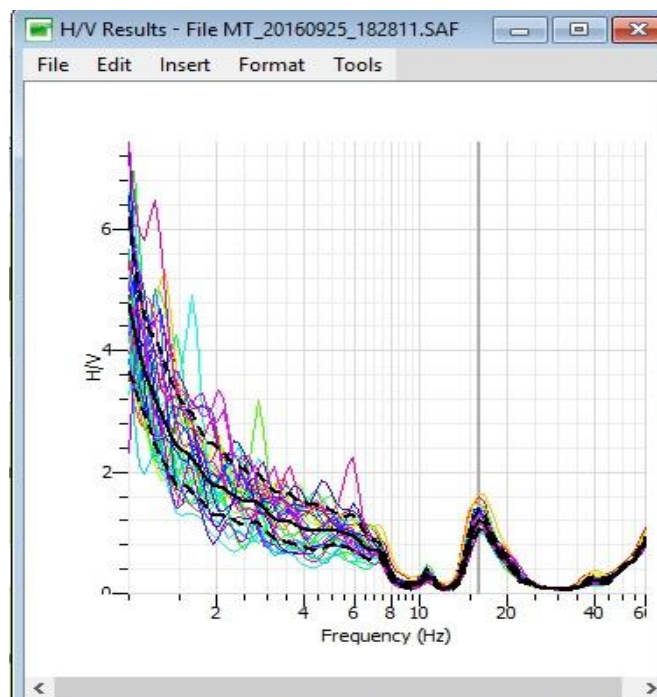


Figura 49 - Gráfico espectral H/V em que cada uma das diferentes cores correspondem respectivamente a cada uma das 35 janelas temporais de tonalidades idênticas (gráfico apresentado na Figura 48). A linha contínua preta representa a curva média em relação a todas as outras curvas coloridas individuais, e as duas linhas a tracejado, acima e abaixo da linha contínua, representam o seu desvio padrão.

CAPÍTULO V

Interpretação dos resultados e Conclusões

VI.1. Resultados do método H/V

Cada ponto obteve a sua frequência fundamental, frequência esta que está diretamente relacionada com a sua posição na carta geotécnica relativamente às unidades presentes.

Assim, relacionando toda a informação, temos a seguinte tabela resumo:

ID	Unidade geotécnica	Descrição	Frequência fundamental
Ponto 1	G3	Depósitos de praias e de terraços fluviais.	1.60 Hz
Ponto 2	G3	Depósitos de praias e de terraços fluviais.	6.26Hz
Ponto 3	G3	Depósitos de praias e de terraços fluviais.	7.42Hz
Ponto 4	G4-G	Solos residuais graníticos medianamente compactos.	5.19 Hz
Ponto 5	G4-G	Solos residuais graníticos medianamente compactos.	4.37 Hz
Ponto 6	G4-G	Solos residuais graníticos medianamente compactos.	5.72 Hz
Ponto 7	G4-G	Solos residuais graníticos medianamente compactos.	3.27 Hz
Ponto 8	G4-G e G8	Solos residuais graníticos medianamente compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade indiferenciados.	13.71 Hz

Ponto 9	G2	Solos aluvionares e coluvionares.	5.47 Hz
Ponto 10	G1	Aterros, lixeiras e/ou entulheiras.	4.53 Hz
Ponto 11	G4-X e G5	Solos residuais metamórficos medianamente compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade indiferenciados.	12.45 Hz
Ponto 12	G9	Maciço granítico rochoso de fraca a excelente qualidade	16.09 Hz

V.2. Interpretação de resultados

Correlacionando as frequências fundamentais resultantes para cada ensaio e as características das unidades onde se encontram, e tendo em conta que geralmente existe uma certa correlação direta e proporcional entre a frequência e a competência mecânica dos materiais do substrato, podemos analisar e resumir algumas relações entre as unidades geotécnicas descritas e os resultados obtidos.

- **Ponto 1, 2 e 3 – (G3)**

Ponto 1

Frequências fundamentais - 1.60 HZ

Este ponto localiza-se sobre a unidade G3 - *depósitos de praias e de terraços fluviais*. Os solos desta unidade são constituídos, em quantidade decrescente, por areias grosseiras a finas, siltes e argilas, e cascalhos. Assume-se assim que a frequência baixa da unidade G3 é derivada da sua compacticidade e espessura.

Ponto 2 e 3

Frequências fundamentais - 6.26 Hz; 7.42 Hz (*respetivamente*)

Os pontos 2 e 3 situam-se igualmente sobre uma unidade G3, mas apresentam uma frequência superior à do ponto 1. Isto pressupõe-se que seja devido à pouca espessura da unidade G3 na zona onde os pontos estão inseridos. Podemos visualizar na figura 48 que, num nível exatamente abaixo (barra vertical), temos uma zona delimitada por G4-G - *solos residuais graníticos medianamente compactos*. Ainda num nível mais profundo (barra horizontal), temos G8 – *solos residuais graníticos compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade*.

O que se pode interpretar nesta incongruência de valores de frequências entre o ponto 1 e os pontos 2 e 3, é que os pontos 2 e 3, mesmo se encontrando na mesma unidade superficial, estão localizados numa zona pouco espessa, em que as camadas que

dominam em termos de efeito de sítio são as camadas inferiores, que por sua vez possuem uma maior competência.

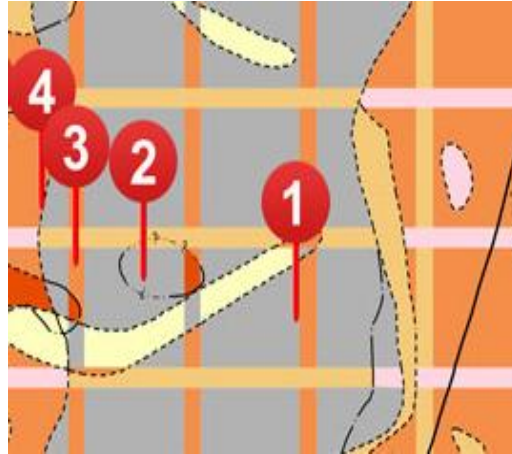


Figura 50 - Localização dos pontos 1,2 e 3 em relação à carta geotécnica.

- **Pontos 4, 5, 6 e 7 – G4-G**

Frequências fundamentais - 5.19 Hz; 4.37 Hz; 5.72 Hz; 3.27 Hz (respetivamente)

Estes pontos, que variam entre 3.27 Hz e 5.72 Hz, apresentam no geral, uma homogeneidade em relação às frequências obtidas. Situam-se em G4-G - *solos residuais graníticos medianamente compactos*, e num nível não aflorante imediatamente abaixo, temos na mesma G4-G, fazendo com que as frequências sejam medianas em relação à competência da sua unidade.



Figura 51 - Posição dos pontos 4,5,6 e 7 em relação à carta geotécnica.

- **Ponto 8 - G4-G e G8**

Frequência fundamental -13.71 Hz

Ponto de frequência alta numa zona de unidade superficial correspondente a *solos residuais graníticos medianamente compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade indiferenciados*. Este ponto encontra-se na mesma situação que os pontos 2 e 3, em que a espessura da camada superior é limitada, o que faz com que a camada dominante seja a camada imediatamente abaixo que corresponde a G9 – maciço granítico de fraca a excelente qualidade. Sendo um maciço uma estrutura mais competente, o resultado da frequência fundamental alta verifica a relação entre a frequência obtida e a unidade a unidades em questão.



Figura 52 - Posição do ponto 8 em relação à carta geotécnica.

- **Ponto 9 e 10 – G2 e G1 (respetivamente)**

Frequência fundamental - 5.47 Hz e 4.53 Hz

G2 - *Solos aluvionares e coluvionares*, e G1 - *Aterros, lixeiras e/ou entulheiras*. Resultado em concordância com as características das unidades menos competentes, constituídas por solos maioritariamente constituídos por siltes e argilas, em menor percentagem por areias grosseiras a médias e, ainda menor por cascalhos.



Figura 53 - Posição dos pontos 9 e 10 em relação à carta geotécnica.

- **Ponto 11 - G4-X e G5**

Frequência fundamental - 12.45 Hz

Ponto com frequência considerada alta. Unidade G4-X e G5 - *Solos residuais metamórficos medianamente compactos a maciço rochoso de muito fraca qualidade indiferenciados*, mas delimitado por unidades G6 – *maciço metamórfico rochoso de fraca a excelente qualidade*, que dado o valor obtido, foi considerada a unidade dominante em termos da resposta de sítio. Uma vez mais baseando-se na pouca espessura da camada superficial G4-X e G5.



Figura 54 - Posição do ponto 11 em relação à carta geotécnica.

- **Ponto 12 – G9**

Frequência fundamental - 16.09 Hz

Frequência mais elevada devido á competência da camada onde se encontra, *Maciço granítico rochoso de fraca a excelente qualidade*, e fundamentado também pela unidade imediatamente no nível aflorante abaixo, G6 – *maciço metamórfico rochoso de fraca a excelente qualidade*. Ponto 12, o ensaio com a unidade mais competente e estável na resposta de sítio às vibrações de ruído.



Figura 55 - Posição do ponto 12 em relação à carta geotécnica.

V.3. Conclusões

Após a análise dos gráficos espectrais e das suas frequências fundamentais, pôde observar-se que existe uma correlação entre as mesmas e a competência mecânica, registando-se frequências mais elevadas em zonas mecânicamente mais competentes, formações de rochas mais “duras”, e frequências mais baixas em zonas mecânicamente menos competentes, em formações de rochas mais “moles”.

Do ponto de vista da perigosidade sísmica podemos afirmar que, de um modo geral, na zona Boavista – Foz, as zonas que apresentam potencialmente uma maior resposta de sítio são as zonas inseridas nos pontos 1,4,5,6,7,9 e 10, zonas estas que apresentam uma frequência fundamental mais reduzida. Isto evidencia a presença de zonas com maior potencial de amplificação relativa no caso de um possível cenário de ocorrência de um sismo de intensidade mais elevada (escala de *Mercalli*).

A análise das amplitudes espectrais é assim importante pois elas refletem a importância relativa dos diferentes picos de frequência obtida.

As conclusões retiradas deste estudo sísmico, podem sintetizar-se do seguinte modo:

- As formações superficiais das zona Boavista-Foz apresentam em geral, uma frequência própria entre os 1.60 Hz e 16.06Hz .
- Para uma estimativa de potenciais danos em caso de sismo futuro, é conveniente cruzar os resultados de um estudo semelhante a este mas de maior escala, com as características dos edifícios existentes (resposta em frequência).
- O método H/V para além das aplicações relacionadas com a gravação de ruído nas 3 componentes já mencionadas, também poderá ser utilizado para a vertente da geotecnia e cartografia, visto haver uma correlação entre as frequências fundamentais de cada local, com as unidades geotécnicas a que correspondem. Assim esta ferramenta permite contribuir para a cartografia geotécnica em ambientes urbanos onde frequentemente existem poucos afloramentos e onde dificilmente se podem levar a cabo ensaios geotécnicos ou outros métodos geofísicos.
- As vantagens deste método relativamente àquilo que foi mencionado no ponto anterior residem:

1. Na sua reduzida dimensão pontual, permitindo efectuar o ensaio em locais espaço disponível reduzido.
2. Baixo custo e rapidez de execução uma vez que não necessita de uma montagem complexa e pesada em termos de mão de obra.
3. Ser um método não invasivo o qual, pela sua natureza passiva, tira partido do ruído ambiente sem a consequente necessidade de fontes sísmicas activas as quais muitas vezes constituem um problema devido aos locais de impacto disponíveis e necessidade de pedidos de autorização.

➤ As desvantagens residem fundamentalmente em:

1. Não fornecer, de uma forma pouco ambigua, valores de velocidades de propagação das ondas.
2. Não fornecer, de uma forma pouco ambigua, valores de profundidades de camadas geológicas.
3. Ser um método que se limita a um resultado unidimensional de certa forma pontual.

VII.1. Referências Bibliográficas

Carta Geotécnica do Porto, 2ª Edição, 2003. Câmara Municipal do Porto COBA, SA – FCUP

Chaminé, H.I., 2000. Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de espinho-albergaria-a-velha (zona de ossa-morena): implicações geodinâmicas. universidade do porto: 497 pp (tese de doutoramento).

European Commission – Research General Directorate, 2004. guidelines for the implementation of the h/v spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. SESAME European research project WP12 – Deliverable D23.12

Lopes, I.M.F., 2001. Avaliação das condições Geológicas e Geotécnicas para a caracterização do risco sísmico aplicação à colina do Castelo de S Jorge. Faculdade de Ciências da universidade de Lisboa. Tese de Mestrado.

Mandrescu N, M. Radulian, Gh. Marmureanu, 2007. Geological, geophysical and seismological criteria for site effects evaluation in Bucharest urban area. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, p. 367-393.

Mussett A.E., & Khan M. A., 2000. Looking into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics. Cambridge, Cambridge University Press.

Nakamura, Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of RTRI, 30:1, 25-33.

Noronha, F., 2005. Carta Geotécnica do Porto: Geologia, tectónica, geomorfologia e sismicidade da cidade do Porto. Workshop, 8pp

Noronha, F., Oliveira, R., Gomes, C., Gouveia, C., Borges, L., Paulo, J.P., 2003. Carta Geológica da Carta Geotectónica do Porto À escala 1:10 000. Câmara Municipal do Porto, COBA, FCUP.

Sousa, M., Sant'Ovaia, H., Tassinari, C. & Noronha, F., 2014. Geocronologia U-Pb (SHRIMP) e Sm-Nd do ortognaisse biotítico do Complexo Metamórfico da Foz do Douro (NW de Portugal). Comunicações Geológicas, 101 (1): 225-228.

Vieira da Silva, J.C. & Flores, D., 2002. Viagem ao património geológico da faixa litoral da cidade do Porto. 27 pp

Victor, L.A.M., 2006. Risco Sísmico – Centro Histórico de Lagos. *Centro Europeu de Riscos Urbanos – EUR-OPA*.